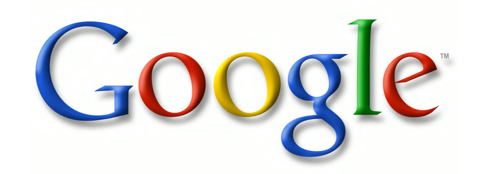


Starkstrom-technik

von

P. Eversheim



Quelle & Meyer  Verlag in Leipzig

W... ...ung

Einz... ...Wissens

Die ... ...s, ohne
Fo... ...aktueller
wissen... ...Fühlung
mit d... ...ihm so
ermög... ...andene
K... ...en

Einführ... gionsge... R. Söd... Volksleb... Professo... Sabbat... fessor D... Einführ... Von Pr...

Die Poesie des Alten Testaments Von Professor Dr. E. König

Geschichte des Judentums Von Professor Dr. H. Meinhold

David und sein Zeitalter Von Professor Dr. B. Baentsch

...en Von ... i ... träge von ... Cornill, ... bschütz, ... B. Herr... Staerk, ... roeltsch. ... Dr. O. ... Knopf

...sbekenntnis Von Professor Dr. K. Thieme

Die evangelische Kirche und ihre Reformen Von Prof. Dr. F. Niebergall

Das Christentum im Weltanschauungskampfe der Gegenwart Von Prof. Dr. A. Hunzinger 3. Aufl.

WISSENSCHAFT UND BILDUNG

Philosophie / Pädagogik

Einleitung in die Philosophie Von Professor Dr. P. Menzer 2. Aufl.

Geschichte der Philosophie Von Professor Dr. A. Messer 3 Bände 3. Aufl.

Philosophie der Gegenwart Von Professor Dr. A. Messer 2. Aufl.

Die Weltanschauungen der Gegenwart in Gegensatz und Ausgleich Von Professor Dr. E. Wenzig 2. Aufl.

Hauptfragen der Lebensgestaltung Von Professor Dr. A. Hunzinger 2. Aufl.

Rousseau Von Geheimrat Professor L. Geiger

Immanuel Kant Von Professor Dr. E. v. Aster 2. Aufl.

Einführung in die Psychologie Von Professor Dr. H. Dyroff 3. Aufl.

Unsere Sinnesorgane und ihre Funktionen Von Professor Dr. E. Mangold 2. Aufl.

Leib und Seele Von Professor Dr. H. Boruttau

Einführung in die Pädagogik auf psychologischer Grundlage Von Professor Dr. W. Peters

Prinzipielle Grundlagen der Pädagogik und Didaktik Von Professor Dr. W. Rein

Abriß der geistigen Entwicklung des Kindes Von Prof. Dr. K. Bühler

Charakterbildung Von Professor Dr. Th. Elsenhans 2. Aufl.

Sprache / Literatur

Unser Deutsch Einführung in die Muttersprache von Geh. Rat Professor Dr. Fr. Kluge 4. Aufl

Lautbildung Von Professor Dr. L. Sütterlin 2. Aufl.

Deutsche Dichtung in ihren geschichtlichen Grundzügen Von Professor Dr. Fr. Lienhard 2. Aufl.

Das Märchen Von Prof. Dr. Fr. von der Leyen 2. Aufl.

Der Sagenkreis der Nibelungen Von Professor Dr. G. Holz 2. Aufl.

Lessing Von Geh.-R. Prof. Dr. R. M. Werner † 2. Aufl. Herausgegeben von Prof. Dr. G. Witkowski

Das klassische Weimar Von Professor Dr. Fr. Lienhard 3. Aufl.

Goethe und seine Zeit Von Professor Dr. K. Alt

Einführung in Goethes Faust Von Prof. Dr. Fr. Lienhard 4. Aufl.

Heinrich von Kleist Von Professor Dr. H. Roetteken

Schweizer Dichter Von Professor Dr. A. Frey 2. Aufl.

Kunst

Einführung in die Ästhetik der Gegenwart Von Professor Dr. E. Meumann 3. Aufl.

Das System der Ästhetik Von Prof. Dr. E. Meumann 3. Aufl.

Musikalische Bildung und Erziehung zum musikalischen Hören Von Professor Dr. A. Schering 3. Aufl.

Grundriß der Musikwissenschaft Von Professor Dr. phil. et mus. H. Riemann 3. Aufl.

Das Klavier und Klavierspiel Von Professor Dr. E. Schmitz

Mozart Von Prof. Dr. H. Freih. v. d. Pfordten 2. Aufl.

Beethoven Von Professor Dr. H. Freiherrn v. d. Pfordten 3. Aufl.

Richard Wagner Von Professor Dr. E. Schmitz 2. Aufl.

Schubert und das deutsche Lied Von Prof. Dr. H. Freih. v. d. Pfordten

Carl Maria von Weber Von Prof. Dr. H. Freih. v. d. Pfordten

Christliche Kunst Von Superintendent R. Bürkner

Christliche Kunst im Bilde Von Professor Dr. G. Graf Vitzthum

WISSENSCHAFT UND BILDUNG

Deutsche Malerei seit 1870 Von Professor Dr. W. Waetzold 2. Aufl.

Geschichte

Eiszeit und Urgeschichte des Menschen Von Professor Dr. J. Pohlig 3. Aufl.
Die Indogermanen Von Professor Dr. O. Schrader 3. Aufl.
Altorientalische Kultur im Bilde Von Dr. J. Hunger und Professor Dr. H. Lamer
Die babylonische Geisteskultur in ihren Beziehungen zur Kulturentwicklung der Menschheit Von Professor Dr. H. Winckler 2. Aufl.
Die Kultur des alten Ägypten Von Prof. Dr. Freiherrn W. v. Bissing 2. Aufl.
Die ägäische Kultur Von Prof. Dr. Freih. R. v. Lichtenberg 2. Aufl.
Griechische Kultur im Bilde Ein Bilderatlas Von Prof. Dr. H. Lamer 2. Aufl.
Vom Griechentum zum Christentum Von Prof. Dr. A. Bauer
Vom Judentum zum Christentum Von Prof. Dr. A. Bauer
Römische Kultur im Bilde Ein Bilderatlas Von Professor Dr. H. Lamer 3. Aufl.
Zur Kulturgeschichte Roms Von Geh. R. Prof. Dr. Th. Birt 3. Aufl.
Das alte Rom Sein Werden, Blühen und Vergehen Von Professor Dr. E. Diehl 2. Aufl.
Cäsar Von Hauptmann G. Veith
Westdeutschland zur Römerzeit Von Prof. Dr. H. Dragendorff 2. Aufl.
Die germanischen Reiche der Völkerwanderung Von Professor Dr. L. Schmidt 2. Aufl.
Grundzüge der Deutschen Altertumskunde Von Prof. Dr. H. Fischer 2. Aufl.
Deutsche Altertümer im Rahmen deutscher Sitte Von Professor Dr. O. Lauffer
Niederdeutsche Volkskunde Von Professor Dr. O. Lauffer
Das deutsche Haus in Dorf und Stadt Von Professor Dr. O. Lauffer
Vom Wikingerschiff zum Handelstauchboot Deutschlands Seeschiffahrt und Seehandel von den Anfängen bis zur Gegenwart Von Professor Dr. B. Schmeidler
Deutsche Kultur des Mittelalters im Bilde Von Professor Dr. P. Herre
Kulturgeschichte der Deutschen im Mittelalter Von Professor Dr. G. Steinhausen 2. Aufl.
Kulturgeschichte der Deutschen in der Neuzeit Von Prof. Dr. G. Steinhausen 2. Aufl.
Die deutsche Revolution (1848) Von Geh.-Rat Prof. Dr. E. Brandenburg 2. Aufl.
Die Technik im Landkriege Von Generalleutnant A. Schwarte
Seehelden und Admirale Von Vize-Admiral H. Kirchhoff
Die Kultur der Araber Von Prof. Dr. J. Hell 2. Aufl.
Mohammed und die Seinen Von Professor Dr. H. Reckendorf
Die Polarvölker Von Dr. H. Byhan

Bürgerkunde und Volkswirtschaftslehre

Einführung in die Rechtswissenschaft Von Prof. Dr. G. Radbruch 3. Aufl.
Staat und Gesellschaft Von Professor Dr. A. Vierkandt
Grundlinien des deutschen Staatswesens V. Geh. Hofr. Dr. R. Schmidt
Staatsbürgerkunde Von Geh. Rat Professor Dr. E. Bernheim 2. Aufl.
Politik Von Professor Dr. Fr. Stier-Somlo 4. Aufl.
Unsere Gerichte und ihre Reform Von Professor Dr. W. Kisch

WISSENSCHAFT UND BILDUNG

Die deutsche Reichsverfassung Von Geh. Rat Prof. Dr. Ph. Zorn 3. Aufl.

Die Haupttheorien der Volkswirtschaftslehre Von Professor Dr. O. Spann 5. Aufl.

Soziale und wirtschaftspolitische Anschauungen in Deutschland vom Beginn des 19. Jahrhund. bis zur Gegenwart Von Prof. Dr. P. Mombert.

Einführung in die Volkswirtschaftslehre Von Professor Dr. W. Wygodzinski 3. Aufl.

Volkswirtschaft und Staat Von Professor Dr. E. Kindermann

Die Praxis des Bank- und Börsenwesens Von Bankdirektor J. Steinberg 2. Aufl.

Die Großstadt und ihre sozialen Probleme Von Prof. Dr. A. Weber 2. Aufl.

Die Kleinwohnung Studien zur Wohnungsfrage Von Baudirektor Professor F. Schumacher 2. Aufl.

Der Mittelstand und seine wirtschaftliche Lage Von Syndikus Dr. J. Wernicke

Die Frauenbewegung in ihren modernen Problemen Von Helene Lange 2. Aufl.

Fürsorgewesen Einführung in das Verständnis der Armut und der Armenpflege Von Professor Dr. Chr. Klumker

Soziale Säuglings- und Jugendfürsorge Von Prof. Dr. A. Uffenheimer

Zoologie und Botanik

Anleitung zu zoologischen Beobachtungen Von Professor Dr. F. Dahl

Der Tierkörper Seine Form und sein Bau Von Privatdozent Dr. E. Neresheimer

Licht und Leben im Tierreich Von Professor Dr. W. Stempell

Die Säugetiere Deutschlands Von Privatdozent Dr. Hennings

Kryptogamen (Algen, Pilze, Flechten, Moose und Farnpflanzen) Von Prof. Dr. M. Möbius

Die Bakterien und ihre Bedeutung im praktischen Leben Von Professor Dr. H. Miehe 2. Aufl.

Anleitung zur Beobachtung der Vogelwelt Von Professor Dr. E. Zimmer 2. Aufl.

Das Schmarotzertum im Tierreich und seine Bedeutung für die Artbildung Von Hofrat Professor Dr. L. v. Graff

Tier- und Pflanzenleben des Meeres Von Prof. Dr. A. Nathansonn

Anleitung zur Beobachtung der Pflanzenwelt Von Professor Dr. F. Rosen 2. Aufl.

Befruchtung und Verbreitung im Pflanzenreiche Von Professor Dr. Giesenhagen

Pflanzengeographie Von Professor Dr. P. Graebner

Phanerogamen (Blütenpflanzen) Von Professor Dr. E. Gilg und Dr. R. Muschler

Zimmer- und Balkonpflanzen Von Garteninsp. P. Dannenberg 2. Aufl.

Unser Garten Von Garteninspektor Fr. Zahn

Von der Hacke zum Pflug Garten und Feld, Bauern und Hirten in unserer Wirtschaft und Geschichte Von Prof Dr. Ed. Hahn 2. verb. Aufl.

Anthropologie / Hygiene

Lebensfragen Der Stoffwechsel in der Natur Von Prof. Dr. F. B. Ahrens

Gesundheit und Lebensklugheit Von Geh. Sanitätsrat Dr. R. Paasch

WISSENSCHAFT UND BILDUNG

Arznei und Genußmittel, ihre Segnungen und Gefahren Von Professor Dr. F. Müller
Der menschliche Organismus und seine Gesunderhaltung Von Oberstabsarzt Dr. A. Menzer
Leib und Seele Von Professor Dr. H. Boruttau
Das Nervensystem und die Schädlichkeiten des täglichen Lebens Von Professor Dr. P. Schuster
Unsere Sinnesorgane u. ihre Funktionen Von Professor Dr. med. et phil. E. Mangold 2. Aufl.
Stoffwechsel und Diät von Gesunden und Kranken Von Geh. Medizinalrat Prof. Dr. C. A. Ewald
Die Volkskrankheiten und ihre Bekämpfung Von Professor Dr. W. Rosenthal
Die Hygiene des männlichen Geschlechtslebens Von Geh. Medizinalrat Prof. Dr. C. Posner 4. Aufl.
Gesundheitspflege des Weibes Von Prof. Dr. P. Straßmann 3./4. Aufl.
Die moderne Chirurgie für gebildete Laien Von Geheimrat Professor Dr. H. Tillmanns

Geologie / Geographie Astronomie / Mineralogie

Grundfragen der allgemeinen Geologie Von Konrektor Dr. P. Wagner 2. Aufl.
Die vulkanischen Gewalten der Erde Von Geheimrat Prof. Dr. A. Haas
Die Bodenschätze Deutschlands Von Professor Dr. L. Milch Bd. I u. II
Mitteleuropa und seine Grenzmarken Von Professor Dr. G. Braun
Die Alpen Von Professor Dr. F. Machatschek 2. Aufl.
Das Wetter und seine Bedeutung für das praktische Leben Von Professor Dr. C. Kassner 2. Aufl.
Das Reich der Wolken und der Niederschläge Von Prof. Dr. C. Kassner
Himmelskunde Von Professor Dr. A. Marcuse 2. Aufl.

Physik / Technik

Die Elektrizität als Licht und Kraftquelle Von Prof. Dr. P. Eversheim 3. Aufl.
Starkstromtechnik Von Professor Dr. P. Eversheim
Elektrochemie Von Professor Dr. W. Bermbach
Hörbare, Sichtbare, Elektrische und Röntgenstrahlen Von Geh. Rat Professor Dr. Fr. Neesen
Telegraphie und Telephonie Von Telegraphendirektor und Dozent F. Hamacher
Das Licht im Dienste der Menschheit Von Dr. G. Leimbach
Kohle und Eisen Von Professor Dr. A. Binz 2. Aufl.
Das Holz Von Forstmeister H. Kottmeier und Dr. F. Uhlmann
Das Buchgewerbe einst und jetzt Von Museumsdirektor Dr. A. Schramm
Die Gärungsgewerbe und ihre naturwissenschaftlichen Grundlagen Von Prof. Dr. W. Henneberg und Dr. G. Bode
Milch- und Molkereiprodukte, ihre Eigenschaften, Zusammensetzung und Gewinnung Von Dr. P. Sommerfeld
Rohstoffe der Textilindustrie Von Geh. Reg.-Rat Dipl.-Ing. H. Glafey
Spinnen und Zwirnen Von Geh. Reg.-Rat Dipl.-Ing. H. Glafey
Die Textilindustrie Herstellung textiler Flächengebilde Von Geh. Reg.-Rat Dipl.-Ing. H. Glafey
Unsere Kleidung und Wäsche Von Direktor B. Brie, Professor P. Schulze, Dr. K. Weinberg

Naturwissenschaftliche Bibliothek

Herausgegeben von Konrad Höller und Georg Ulmer

Jeder Band von 140–200 Seiten mit zahlreichen Abbildungen. Geb. M. 2.50

An die Jugend wenden sie sich und an den Mann aus dem Volke, um mit ihrer streng allgemeinverständlichen und also im besten Sinne populären Darstellung Kenntnis der Natur und Anregung zu eingehender Beschäftigung mit ihren Erscheinungen in die weitesten Kreise zu tragen. Schule und Haus haben in gleicher Weise alle Ursache, dieser neuen Naturwissenschaftlichen Bibliothek die ernsteste Beachtung zu schenken. Jedes dieser Bändchen ist ein Muster einer vornehmen und allen Ansprüchen genügenden Ausstattung.

Aus der Natur

Es ist erschienen:

- **Aus Deutschlands Urgeschichte** Von G. Schwantes 2. Aufl.
- **Der deutsche Wald** Von Prof. Dr. M. Buesgen 2. Aufl.
- **Die Heide** Von W. Wagner
- **Im Hochgebirge** Von Professor E. Keller
- **Tiere der Vorzeit** Von Rekt. E. Haase
- **Kultur und Tierwelt** Von Prof. Dr. R. Guenther
- **Die Tiere des Waldes** Von Forstmeister K. Sellheim
- **Unsere Singvögel** Von Professor Dr. A. Voigt
- **Das Süßwasseraquarium** Von E. Heller
- **Reptilien- und Amphibienpflege** Von Dr. P. Krefft
- **Bienen und Wespen** Von Ed. Scholz
- **Bilder aus dem Ameisenleben** Von H. Viehmeyer
- **Die Schmarotzer der Menschen und Tiere** Von General-Oberarzt a. D. Dr. v. Linstow
- **Die mikroskopische Kleinwelt unserer Gewässer** Von E. Reukauf
- **Unsere Wasserinsekten** Von Dr. G. Ulmer
- **Aus Seen und Bächen** Von Dr. G. Ulmer
- **Aus der Vorgeschichte der Pflanzenwelt** Von Dr. W. Gothan
- **Wie ernährt sich die Pflanze?** Von O. Krieger
- **Niedere Pflanzen** Von Professor Dr. R. Timm
- **Häusliche Blumenpflege** Von P. F. F. Schulz
- **Gartenlust und -leben von alters her bis in unsere Zeit** Von Gartendirektor F. Zahn
- **Der deutsche Obstbau** Von F. Meyer
- **Vulkane und Erdbeben** Von Prof. Dr. Brauns
- **Chemisches Experimentierbuch** Von O. Hahn
- **Die Photographie** Von W. Zimmermann
- **Beleuchtung und Heizung** Von J. F. Herding
- **Kraftmaschinen** Von Ingenieur Ch. Schütze
- **Signale in Krieg und Frieden** Von Dr. Fr. Ulmer
- **Seelotsen-, Leucht- u. Rettungswesen** Von Dr. F. Dammeyer

Wilhelm Scharrelmann

Täler der Jugend Roman. 218 Seiten. Geh. M. 5.—. Geb. M. 7.—

„Täler der Jugend" — das sind die blumigen Gründe mit den jungen Hainen der ersten Freundschaft und der ersten Liebe, durch die der junge Mensch wie durch ein Märchenland geht. „Täler der Jugend" — das sind aber auch die Niederungen, durch die jedes junge Leben geht, ehe es die Kraft findet, die Höhen und Gipfel zu erklimmen. Es ist der Roman eines jungen Arbeiterkünstlers, der den Willen und den Drang zur Höhe hat und einen einsamen Weg geht. Mädchenbilder von einer zarten, milden Schönheit, wie mit dem Silberstift gezeichnet, wandeln durch den Roman.

Rund um Sankt Annen Neue Pickbalge-Geschichten. 269 Seiten. Geheftet Mark 5.—. Gebunden Mark 7.—

Es ist eine völlig einheitliche, in sich abgeschlossene Welt, die „Pickbalge", aus der Wilhelm Scharrelmann diesen neuen Band humorvoller Erzählungen geschrieben hat. In eine enge, vom Strom des Großstadtlebens abseits liegende Gasse, in eine idyllische Welt hat Scharrelmann mit dem Auge des Dichters geblickt und mit sicheren Strichen merkwürdige Gestalten und ergötzliche Geschichten daraus festgehalten, die sich dem Leser mit einer Eindringlichkeit einprägen, daß man sie nicht leicht wieder vergißt.

Piddl Hundertmark Geschichte einer Kindheit. 3. Auflage. 188 Seiten. Geheftet M. 2.—. Gebunden M. 4.60.

„Ein herzhafter und gesunder Geist weht durch dieses Buch, und ein aufrechter Mann steht dahinter. Er ist mit den Worten eher sparsam als verschwenderisch; er moralisiert und reflektiert nicht; er hat mit sicherem Gefühl an der rechten Stelle nicht nur angefangen zu erzählen, sondern — was seltener und schwieriger ist — auch aufgehört. . . Man kann sich an dieser Geschichte einer Kindheit recht erfrischen — sie gehört vor allem in sämtliche Volksbibliotheken."

„Velhagen und Klasings Monatshefte."

Die Fahrt ins Leben Bilder u. Geschichten. 239 Seiten. Geheftet Mark 4.—. Gebunden Mark 6.—

„Jedermann wird seine Freude haben an diesen kleinen Geschichten, die gleicherweise durch ihren eigenartigen Inhalt, wie durch die plastische Darstellung fesseln. Ob nun der Schalk aus den Blättern guckt oder vom Ernst und Kampf des Lebens erzählt wird oder moderne Anekdoten auf eine Schnur gereiht erscheinen — ein Grundsatz geht durch all die bunten Bilderchen; das ist der Kinderplauderton, der in den einfachsten Dingen eine Seele sieht, toten Gegenständen Leben einhaucht und vom Geheimsten Kunde bringt."

Die Hilfe.

Wissenschaft und Bildung
Einzeldarstellungen aus allen Gebieten des Wissens
143

Starkstromtechnik

Von

Professor Dr. P. Eversheim
a. d. Universität Bonn



1920
Verlag von Quelle und Meyer in Leipzig

Buchdruckerei Richard Hahn (H. Otto) in Leipzig.

Vorwort.

Einer Aufforderung des Herrn Verlegers folgend, habe ich im vorliegenden Bändchen der Sammlung „Wissenschaft und Bildung" den Versuch gemacht, aus dem ausgedehnten Gebiet der Elektrotechnik einen Grundriß zusammenzustellen, der in möglichst anschaulicher und leicht verständlicher Form den Leser mit dem Wesen des elektrischen Stromes und seiner vielseitigen Verwendung im täglichen Leben, im Gewerbe und in der Industrie bekannt machen soll. Bei der Sichtung des Stoffs stellte sich aber heraus, daß es selbst bei knapper Darstellung nicht möglich sein würde, das umfangreiche Material aus dem Gesamtgebiet der Elektrotechnik so zusammenzudrängen, daß es sich im Rahmen eines Bändchens der Sammlung unterbringen ließe. Ich hielt es deshalb für geboten, mich lediglich mit der Starkstromtechnik zu befassen und so der Notwendigkeit zu entgehen, besonders wichtige Gebiete nur flüchtig zu behandeln.

Der Besprechung der Apparate, Maschinen und Einrichtungen wurde ein kurzer Überblick der wichtigsten und grundlegenden Gesetze vorangeschickt, auch mußten zur Erklärung verwickelter Vorgänge graphische Darstellungen herangezogen werden, denn der Leser soll sich nicht nur äußerlich über den in Frage stehenden Gegenstand unterrichten, er soll auch in das innere Wesen eindringen und den Zusammenhang der dort wirkenden Kräfte auch wirklich verstehen. Dies gilt namentlich auch für jene, die in den zahlreichen technischen Betrieben tätig, mancherlei Funktionen auszuführen haben, ihre Tätigkeit aber nur zu oft rein mechanisch entfalten und sicherlich den Wunsch haben, den Zweck und die Bedeutung jener Mechanismen und Einrichtungen kennen zu lernen, die ihrer Wartung anvertraut sind.

Der Verfasser würde aber seine Aufgabe nur unvollkommen lösen können, wenn er es unterlassen wollte, den Stoff dem Leser auch im Bilde anschaulich vor Augen zu führen. Dazu dienen teils Zeichnungen und Stromlaufskizzen, teils aber, und nicht zum geringsten Teil, jene ausgezeichneten Darstellungen unserer führenden Firmen, wie sie der Neuzeit entsprechen und deren Druckstöcke mir gütigst zur Verfügung gestellt wurden. Dies und die vortreffliche Ausstattung des Bändchens bei dem trotz der schwierigen Verhältnisse niedrigen Preis wird, so hoffe ich, auch dieses Bändchen würdig in die Reihe seiner Vorgänger eingliedern.

Bonn, März 1920.

Der Verfasser.

Inhaltsübersicht.

Einleitung.

Lange schon kannte man den elektrischen Strom und seine Wirkungen, kannte man die Gesetze, nach denen sich die Vorgänge regeln: hatte man doch im galvanischen Element ein bequemes Mittel, um mit Ruhe und Beschaulichkeit das Wesen der elektrischen Erscheinungen des Geheimnisvollen, des Rätselhaften zu entkleiden, und diese Stromquelle genügte dem Forscher jahrelang. Als aber der Forscher nach und nach in Experiment und Vortrag der Welt die kostbaren Eigenschaften des elektrischen Stromes vorführte, als er die Schätze an Licht und Wärme, an Kraft und Arbeit diesem neuen Born entnahm, da drängte es den Menschengeist gewaltig, die neu gewonnene Naturkraft für sich nutzbar zu machen, sie in seinen Dienst zu stellen. Doch so bald sollte ihm dies nicht glücken. Konnte man zwar durch Anhäufen von Elementen Batterien zusammenstellen, die starke Ströme zu liefern vermochten, so mußte man doch bald erkennen, daß sich diese Stromlieferanten gar zu bald erschöpften und nach kurzem Betrieb neue Nahrung forderten, und diese Nahrung war unerschwinglich kostspielig. So blieb der Laboratoriumsversuch der Gelehrten auch in der Praxis nur ein Versuch: jener konnte sich ungehemmt weiter entwickeln, diesem fehlte das, was die Technik erst lebenskräftig macht, die wohlfeile Erzeugung des wirkenden Agens mit einfachen Mitteln.

Doch jene ungehemmte Entwicklung der Forschung zeitigte gar bald goldene Früchte; die Erkenntnis des Zusammenhangs der in Betracht kommenden Naturkräfte ermöglichte es, Stromquellen zu erschließen, die in unerschöpflicher Menge, in jeder Abstufung, Stromart und -stärke, bei direkter oder indirekter Ausnützung anderer zur Verfügung stehender Naturkräfte, Strom zu liefern vermochten. So war das Fundament geschaffen, wohl geeignet, den mächtig emporstrebenden Aufbau zu tragen und unter der Führung genialer Männer, in rastloser Tätigkeit, zum Teil nicht ohne große Hingebung, aber mit verlockendem Ziel im Auge entstand das stolze Gebäude der Elektrotechnik.

Erstes Kapitel.

Grundlegende Begriffe, Einheitsgrößen, die wichtigsten Gesetze. Beziehung der elektrischen Energie zu anderen Energieformen.

Die Technik der angewandten Elektrizität kann man in zwei Gebiete einteilen, in die Schwach- und Starkstromtechnik. Die erste ist die älteste, sie befaßt sich mit jenen elektrischen Einrichtungen und Anlagen, bei denen meist galvanische Elemente als Stromquelle benutzt werden, sie umfaßt das gesamte Gebiet des Telegraphenwesens, von der einfachen Hausklingel bis zum verwickelten Telephonsystem. Die Einrichtungen dieser Technik sowie die physikalischen Grundlagen sind in besonderen Bändchen dieser Sammlung bereits ausführlich behandelt[1]), der Zweck des vorliegenden Bändchens ist, dem Leser einen klaren Einblick in das Wesen der Starkstromtechnik zu verschaffen.

Wie die Schwachstromtechnik heute für die Bedürfnisse des Lebens ganz unentbehrlich ist, und in dem komplizierten Mechanismus des modernen Verkehrs die erste Stelle einnimmt, so ist auch das Gebiet, auf dem der Starkstrom sich betätigt, ganz außerordentlich mannigfaltig und in der Anwendung so vielgestaltig, daß der Kulturmensch es eigentlich jeden Tag betritt, ja, die entferntesten Gegenden, einsame Dörfer, entlegene Gehöfte erfreuen sich heute der Wohltat des elektrischen Stromes, er ist ein wahrer Freund des Menschen, oft freilich ein unbekannter Freund, den kennen zu lernen und mit dem vertraut zu werden aber der Wunsch so vieler ist: dies zu vermitteln, hat sich der Verfasser zur Aufgabe gemacht.

Es gibt wohl kaum eine Arbeitsmaschine, bei der die Art der Arbeitsleistung so sinnfällig in die Erscheinung tritt wie beim Wasserrad, und leicht können wir uns über die Vorgänge ein klares Bild machen. Warum dreht sich das Rad und kann Arbeit leisten? Die Antwort ist selbstverständlich: weil das Wasser immerfort die Schaufeln des Rades füllt und diese durch sein

[1]) Telegraphie und Telephonie, v. F. Hamacher, diese Sammlung, Einführung in die Elektrochemie, v. W. Bermbach, diese Sammlung, Die Elektrizität als Licht und Kraftquelle, v. P. Eversheim, diese Sammlung.

Gewicht, also mit einer gewissen Kraft nach der tiefsten Stelle drückt und dann abfließt. Wir fragen weiter: wovon hängt die Arbeitsleistung ab, oder, ganz roh ausgedrückt, das Vermögen des Rades beispielsweise in einer Mühle einen oder mehrere Mahlgänge gleichzeitig anzutreiben? Auch die Beantwortung dieser Frage scheint uns selbstverständlich: die Arbeitsleistung muß abhängen von der Menge des verfügbaren Wassers. Ein kurzes Nachdenken aber zeigt uns weiter, daß diese Antwort noch nicht genügt, denn die Wassermenge an sich kann nicht allein bestimmend sein für die größere oder geringere Leistung, denn ein Teich, ein See kann gewaltige Wassermassen enthalten, ohne die geringste Arbeitsleistung zu entfalten, denn dazu ist eine treibende Kraft nötig, die das Wasser in Strömung versetzt, nämlich Gefälle oder Niveauunterschied zwischen zwei Stellen des Wasserspiegels. Wir ergänzen also unsere Antwort dahin, daß wir sagen: die Arbeitsleistung hängt ab von der in einer bestimmten Zeit abfließenden Wassermenge, auch Stärke des Stromes genannt, und diese wiederum hängt ab von dem Druck oder Höhenunterschied zwischen zwei Stellen des Gerinnes sowie von dessen Beschaffenheit.

Den Gedankengang dieser kurzen Darlegungen können wir ohne weiteres auf die elektrischen Erscheinungen übertragen und uns in analoger Weise die wichtigsten elektrischen Begriffe klar machen. Daß der elektrische Strom Arbeit leisten kann, weiß heute jedes Kind (elektrische Bahn u. dgl.), und zwar hängt auch hier die größere oder die geringere Leistung von dessen Stärke, d. h von der in einer bestimmten Zeit den Leiterquerschnitt durchfließenden Elektrizitätsmenge ab Damit aber diese durch den Leiter befördert wird, ist eine treibende Kraft nötig, genau so wie bei der Arbeitsleistung durch das angetriebene Wasser, die elektromotorische Kraft. Und ebenso, wie die treibende Kraft des Wassers durch den Niveau- oder Höhenunterschied hervorgerufen wird, so ist sie auch hier an die Existenz des Höhenunterschiedes der elektrischen Spannung, der Potentialdifferenz geknüpft, wie sie z B. an den Klemmen eines galvanischen Elementes, einer Batterie oder der Dynamomaschine besteht. Dieser wichtige Begriff des Spannungsunterschiedes wird in der Technik kurz Spannung genannt. Die Spannung ist also das Ursächliche für den elektrischen Strom, er strömt vom höheren Potential, dem positiven (+) zum niedrigeren, dem

negativen (—) Pol, sofern ihm ein Leiter gegeben ist. Wir erkennen daher, daß diese drei Größen, Spannung, Stromstärke und Leiter (Widerstand) für die Wirkung unzertrennlich sind, fehlt eine von ihnen, so ist der elektrische Vorgang nicht möglich.

Wenn aber die drei wichtigsten Fundamentalgrößen in fester Beziehung zueinander stehen, so kann diese nicht regellos sein oder von Zufälligkeiten abhängen, sie werden vielmehr durch eine bestimmte Gesetzmäßigkeit miteinander verknüpft sein. In der Tat wies der deutsche Gelehrte Ohm um das Jahr 1826 nach, daß die Stromstärke mit zunehmender Spannung wächst, dagegen in dem Verhältnis abnimmt, wie der Widerstand der Leitung vergrößert wird. Wenden wir uns einen Augenblick wieder der Wasserkraft zu, so finden wir dort gleichliegende Verhältnisse, die unserer Überlegung auch ganz plausibel erscheinen: je größer das Gefälle eines Wasserlaufs ist, um so schneller fließt das Wasser ab, d. h. um so größer die pro Zeiteinheit beförderte Wassermenge, und ferner, je größer der Widerstand des Leitungsbettes ist, hervorgerufen etwa durch unebene rauhe Flächen des Gerinnes, durch Krümmungen, durch Länge der Leitung bei geringem Querschnitt u. dgl., um so geringer die Stärke des Wasserstromes.

In der Elektrizitätslehre sowie in der Technik ist es üblich, alle wichtigen Größen mit bestimmten Buchstaben zu bezeichnen. Dadurch wird die Übersicht namentlich bei Skizzen und Zeichnungen sowie die Schreibweise vereinfacht und vor allem auch das Rechnen erleichtert. Wir werden uns auch an die Bezeichnungen halten und merken uns:

Es bezeichnet, wenn nicht anders bemerkt

I oder i = Stromstärke (Intensität).

E oder e = Spannung oder Elektromotorische Kraft (letztere auch wohl mit EMK bezeichnet).

W oder w = Widerstand, oder, da hierfür auch die Bezeichnung Rheostat üblich ist = R oder r.

Bezeichnen die genannten Buchstaben zugleich die Einheitsgrößen (wie z. B. m die Längeneinheit = Meter, kg die Gewichtseinheit = Kilogramm u. a. m.), so lautet das Ohmsche Gesetz

$$I = \frac{E}{W}; \; E = I \cdot W; \; W = \frac{E}{I}.$$

Dies ist das wichtigste Gesetz für den Elektrotechniker, er muß

es jeden Augenblick zur Hand haben, denn es leistet ihm, wie wir sehen werden, die wichtigsten Dienste.

Welche Einheiten gelten nun für die Stromstärke, für die Spannung und den elektrischen Widerstand der Leitung? Dem Namen nach sind diese heute jedermann bekannt: Ampere, Volt und Ohm[1]). Jetzt werden wir versuchen, eine bestimmte Vorstellung mit diesen Bezeichnungen zu verbinden. Dabei wollen wir absehen von der rein theoretischen Herleitung, wir werden uns vielmehr an praktische Beispiele halten. Die heute gebräuchliche Glühlampe für Zimmerbeleuchtung hat etwa 50 Kerzenstärken; mit welcher Stromstärke brennt die Lampe? Die Messung ergibt etwa ¼ Ampere, d. h. also: die Stromstärke von 1 Ampere vermag vier normale Zimmerlampen zu betreiben. Allerdings — und nun kommen wir zum zweiten Punkt — unter der Voraussetzung einer bestimmten Spannung, nämlich der meist gebräuchlichen Netzspannung von 220 Volt. 220 derartiger Einheitsspannungen sind also nötig, um den Lampen den erforderlichen Strom zuzuführen. Wir können uns den Voltbegriff noch in anderer Weise klar machen. Das bekannte Salmiakelement, wie es bei Klingelleitungen benutzt wird oder wie es sich in der Batterie der Taschenlampe vorfindet, besitzt etwa 1,3 Volt Klemmenspannung[2]), man müßte also etwa 170 solcher Elemente hintereinanderschalten, um die Lampenspannung zu erhalten. Die Taschenlampenbatterien enthalten gewöhnlich 3 Elemente hintereinander geschaltet, man kommt so auf etwa 4 Volt, daher: 4 Volt Lämpchen.

Nun bleibt noch die Widerstandseinheit, das Ohm, zu erklären. Das was den Strom am freien Abfließen hindert, nämlich der Widerstand, hängt von drei Dingen ab: von der Länge der Leitung, indem mit zunehmender Länge der Widerstand wächst, von dem Querschnitt der Leitung, indem mit dessen Zunahme der Widerstand abnimmt, und endlich von dem Material des Leiters, denn es ist bekannt, daß es gute und schlechte Leiter gibt, daß Kupfer zu den besten Leitern zählt, daß Eisen weniger gut leitet u. s. f. Wenn wir nun eine Widerstandseinheit auf-

[1]) Benannt nach dem französischen Physiker Ampère, dem Italiener Volta und dem deutschen Gelehrten Ohm.

[2]) So nennt man die an den Polklemmen herrschende Spannung einer Stromquelle, während sie Strom abgibt; die elektromotorische Kraft bezieht sich auf die Polspannung mit offenem Stromkreis, sie ist größer als die Klemmenspannnug.

stellen wollen, so müssen wir über diese drei an sich veränderliche Größen ganz bestimmte Vorschriften erlassen. Dies hat zuerst Werner von Siemens im Jahre 1860 getan, indem er vorschrieb: „Die Einheit des Widerstandes hat eine Quecksilbersäule bei 0° Celsius von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt". Diese Siemenssche Einheit wird praktisch heute nicht mehr gebraucht, das Ohm ist ihr aber nachgebildet und nahe verwandt, es gilt die gleiche Definition, bezogen aber nicht auf 1 m Länge, sondern auf die Länge von 1,06 m. Der Grund für die Annahme dieser etwas unrunden Zahl beruht darauf, daß sich in diesem Falle die praktische Widerstandseinheit ohne unbequemen Zahlenfaktor nach dem Ohmschen Gesetz in den beiden anderen Größen Volt und Ampere ausdrücken läßt, so daß das oben angegebene Ohmsche Gesetz in die Einheiten eingekleidet lautet:

$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Ohm}}{1 \text{ Volt}}; \; 1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm};$$

$$1 \text{ Ohm} = \frac{1 \text{ Ampere}}{1 \text{ Volt}}.$$

Wir können nun schon eine kleine Rechnung anstellen. Es sei die Stromstärke in einer einfachen elektrischen Leitung zu bestimmen. Um klar zu sehen, entwerfen wir nach Abb. 1 eine kleine Skizze und halten uns dabei an die übliche Schreib- und Darstellungsweise. Es sei E die Betriebsspannung, die etwa von Elementen, wie dies durch lange und kurze Striche angedeutet ist, geliefert werde. Der Strom fließt in einer bestimmten Richtung vom positiven (+) zum negativen (—) Pol: —➤I. Der Widerstand W des Stromkreises, angedeutet durch eine zickzackförmige Linie, sei = 200 Ohm, die Spannung betrage 100 Volt, dann ist die Stromstärke $I = \frac{100}{200} = 0{,}5$ Ampere. In ähnlicher Weise kann man eine der anderen Größen berechnen, sobald die übrigen bekannt sind.

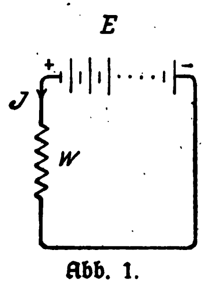


Abb. 1. Schaltungsschema.

Nicht so einfach gestalten sich die Verhältnisse bei Anlagen, bei denen, was meist der Fall ist, keine einfache Leitung vorliegt, sondern der Strom mehr oder weniger stark verzweigt ist. Es sei in Abb. 2 I der Hauptstrom, die Hauptleitung führe zu

den Punkten a und b, hier findet Stromverzweigung nach drei Richtungen statt, wir bezeichnen die **Zweigströme** mit i_1, i_2 und i_3, dann sagt uns ein Satz von **Kirchhoff**:

$$I = i_1 + i_2 + i_3,$$

d. h.: der Hauptstrom ist gleich der Summe der Zweigströme. Was die **Stärke** der Zweigströme anbelangt, so gibt uns darüber folgende Überlegung Aufschluß. Das zwischen den Zweigstellen a und b herrschende Spannungsgefälle, hervorgerufen durch die Elektrizitätsquelle E, ist offenbar für sämtliche Zweigleitungen gleich. Bezeichnen wir nun deren Widerstände mit w_1, w_2 und w_3, so gilt nach dem Ohmschen Gesetz, wenn wir die Spannung zwischen a und b mit e bezeichnen

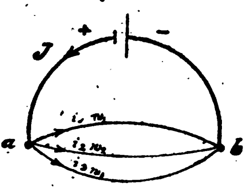


Abb. 2.
Stromverzweigung.

$$e = i_1 \times w_1 = i_2 \times w_2 = i_3 \times w_3.$$

Nach dem bekannten Satz: „Gleiches durch Gleiches dividiert gibt Gleiches" ergibt sich, wenn wir etwa $i_1 \times w_1 = i_2 \times w_2$ beiderseits durch $i_2 \times w_1$ dividieren

$$\frac{i_1 \times w_1}{i_2 \times w_1} = \frac{i_2 \times w_2}{i_2 \times w_1} \text{ oder } \frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1};$$

d. h. in Worten: **die Ströme in den einzelnen Zweigen verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände.**

Die in Abb. 2 dargestellte Verzweigung nennt man **Parallelschaltung**; so ist also der Zweig i_1 parallel geschaltet zu i_2 und i_3. Diese Schaltungsart spielt bei der Elektrizitätsverteilung eine wichtige Rolle, indem die normalen Lampen, Motoren u. dgl. immer parallel an das Netz angeschlossen werden. Der Widerstand zwischen zwei Punkten einer Parallelschaltung, also nach Abb. 2 zwischen a und b berechnet sich aus der Summe der **Leitfähigkeiten**. Die Leitfähigkeit ist das Reziproke vom Widerstand, d. h. bezeichnen wir sie mit L resp. l, so besteht die Beziehung $W = \frac{1}{L}$; $w = \frac{1}{l}$. Wir haben also $L = l_1 + l_2 + l_3$, daher $\frac{1}{W} = \frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} + \frac{1}{w_3}$; hieraus läßt sich W berechnen, für zwei Zweige ist z. B. $W = \frac{w_1 \times w_2}{w_1 + w_2}$, es ist dies leicht zu

behalten: man dividiert das Produkt aus den beiden Widerständen durch deren Summe. Für drei und mehr parallel geschaltete Leiter wird der Ausdruck komplizierter.

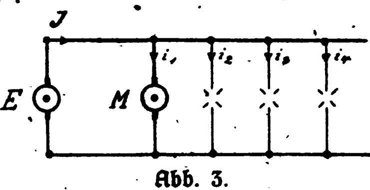


Abb. 3.
Schaltung im Verteilernetz.

Abb. 3 veranschaulicht das Schaltungsschema eines Verteilernetzes. Eine Dynamomaschine liefert die Spannung E, der Hauptstrom I verzweigt sich im Netz in den Zweigstrom i_1 zum Betrieb des Elektromotors M, ferner in die drei Zweigströme i_2, i_3, i_4, die zum Betriebe von Lampen dienen. Es ist also $I = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$.

Die zweite Möglichkeit der Verbindung mehrerer Leiter zu einer Gesamtleitung bietet die Reihen- oder Serienschaltung. Bei dieser sind die einzelnen Leiterteile hintereinander geschaltet, wie dies Abb. 4 veranschaulicht. Hier ist aber der Strom I nicht etwa gleich der Summe der einzelnen Ströme i_1, i_2 und i_3, es gilt vielmehr der Satz: in einer unverzweigten Leitung hat die Stromstärke, in welchem Leiterteil wir sie auch betrachten mögen, immer den gleichen Wert, daher: $I = i_1 = i_2 = i_3$. Es ist einleuchtend, daß hier der Gesamtwiderstand zwischen a und b sich aus der Summe der Einzelwiderstände zusammensetzt und nicht, wie bei der Parallelschaltung, sich aus der Summe der Leitfähigkeiten berechnet. Wir haben also

Abb. 4.
Serienschaltung.

$$W = w_1 + w_2 + w_3.$$

Die Serienschaltung findet bei der Stromverteilung nur in vereinzelten Fällen Anwendung, so z. B. bei den Kerzen oder Illuminationslampen, wie man sie an Kronleuchtern, bei Schaufensterdekorationen und in ähnlichen Fällen findet (Serienlampen).

Jede Elektrizitätsquelle repräsentiert einen gewissen Vorrat an Arbeitsvermögen, eine bestimmte Energie. Die Natur bietet uns eine Reihe verschiedener Formen von Energie: mechanische Energie, Wärmeenergie, chemische Energie, elektrische Energie u. a. m. Wie verschiedenartig aber äußerlich diese Energie-

formen in die Erscheinung treten, eines ist ihnen allen gemeinsam: bei der Umwandlung in eine andere Form wird weder Arbeit gewonnen noch geht solche verloren. Die umgewandelte Energie ist derjenigen, aus der sie entstanden ist, völlig gleichwertig, äquivalent. Dieser Satz enthält das durch die Erfahrung stets bestätigte wichtige Naturgesetz von der Erhaltung der Energie.

In der Elektrotechnik findet eine fortwährende Umwandlung verschiedener Energieformen statt. Wir lassen die Wassermassen auf Wasserräder oder Turbinen wirken und treiben damit die stromliefernden Maschinen an, verwandeln also mechanische in elektrische Energie. Diese wiederum wird vermittelst der Elektromotoren in mechanische Arbeit zurückverwandelt, in den Beleuchtungskörpern kommt sie in Form von Licht und Wärme wieder zum Vorschein, im Hüttenwesen bewirkt sie die chemische Zersetzung von Verbindungen, bildet freie Metalle und Gase. Wenn die Umwandlung stets gesetzmäßig erfolgt, so kann man fragen, wie groß ist etwa die elektrische Energie, die der Arbeitsleistung einer Pferdekraft entspricht? Welche Wärmemenge ist der elektrischen Energie äquivalent?

Unter Pferdekraft verstehen wir eine bestimmte Arbeitsleistung in Form mechanischer Energie, unter Leistung die in einer bestimmten Zeit verrichtete Arbeit verstanden. In der Praxis legt man der Arbeitseinheit das Kilogrammeter (kgm) zugrunde. Arbeit wird dargestellt durch das Produkt: Kraft × Weg in Richtung der Kraft; ein Kilogrammeter ist daher diejenige Arbeit, die die Kraft von 1 kg auf der Wegstrecke von 1 m leistet. 75 derartiger Einheiten bezogen auf die Sekunde ist die technische Leistungseinheit von einer Pferdestärke (PS):

$$1 \text{ PS} = \frac{75 \text{ kgm}}{\text{sec}}.$$[1]

Die elektrische Leistung ist gegeben durch das Produkt aus Stromstärke multipliziert mit der zugehörigen Spannung. Dieses Produkt nennt man Watt, wenn man Stromstärke und Spannung in Ampere und Volt ausdrückt: 1 Volt × 1 Ampere = 1 Watt. Nun läßt sich leicht beweisen, daß 736 Watt der Leistung von 1 PS entsprechen; es ist dies ein wichtiger Zusammenhang, den man sich gut merken muß.

[1]) Das englische HP (Horse-power) ist $= 76 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$.

Meist wird in der Technik das Tausendfache von 1 Watt der Leistungsberechnung zugrunde gelegt, man spricht von Kilowatt = 1000 Watt. Der Verbrauch der elektrischen Energie, so wie er von den Elektrizitätszählern angegeben wird, ist das Produkt aus Leistung × Zeit, denn mit den beiden Faktoren nimmt er zu. Die Zeit rechnet man in Stunden, man erhält so den Begriff der Wattstunde für den Verbrauch oder die Arbeit, die zu bezahlen ist.

Die Kenntnis der Beziehung zwischen der elektrischen Energie und der mechanischen setzt uns in den Stand, ohne weiteres die benötigten Pferdestärken auszurechnen, die etwa eine elektrische Anlage fordert, wobei allerdings der Wirkungsgrad, d. i. das Verhältnis der entnommenen zur aufgewandten Energie zu berücksichtigen ist. Dieser Wirkungsgrad ist immer kleiner als 1, also ein echter Bruch, da natürlich bei der Umwandlung ein Teil der aufgewandten Energie verloren geht; sie tritt in Form von Wärme, als Kupfer- und Eisenverlust auf, ferner infolge der Lagerreibung und des Luftwiderstandes. In der Praxis rechnet man mit guter Annäherung für eine Überschlagsrechnung auf die Erzeugung von 1 Kilowatt (KW) 2 PS. Andererseits kann man für motorische Leistung einen Aufwand von etwa 1 KW pro PS annehmen. Bei Wechselstrom sind die auf S. 65. näher angegebenen Verhältnisse zu berücksichtigen.

Ebenso leicht läßt sich der Wärmeeffekt berechnen, indem wir auch hier die Beziehung zwischen einer bestimmten Wärmemenge und der äquivalenten elektrischen Energie beachten. Wärmemengen mißt man in Kalorien[1]. 1 Grammkalorie (gKal) ist die Wärmemenge, die der Masse von 1 g Wasser zugeführt werden muß, um dessen Temperatur von 0° auf 1° zu erhöhen. Es läßt sich berechnen, daß 1 Watt gleichwertig $0{,}24\,\frac{\text{gKal}}{\text{sec}}$ ist[2], also $1\ \text{KW} = 240\,\frac{\text{gKal}}{\text{sec}}$. Für den praktischen Fall heißt dies:

[1]) Man unterscheidet die kleine, Grammkalorie, und die große, Kilogrammkalorie (s. a. S. 111).

[2]) Nach dem Jouleschen Gesetz ist die Wärmemenge A dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstand des betreffenden Leiters proportional: Q prop. $I^2 W$. Da nach dem Ohmschen Gesetz $W = \frac{E}{I}$ ist, so können wir auch schreiben: Q prop. $I \times E$, d. h. es ist A in der Tat der Wattleistung proportional.

1000 Volt-Ampere, also beispielsweise der Strom von 10 Ampere vermag bei einer Spannung von 100 Volt etwa ¼ l Wasser pro sec. um 1° C zu erwärmen (s. a. Kochgefäße u. f. auf S. 111).

Man pflegt heute die Leistung von Maschinen nicht mehr in Pferdestärken anzugeben, sondern bedient sich des Einheitsmaßes Watt. Wir sahen, daß 736 Watt = 1 PS ist, daher in runder Zahl 1 KW = 100kgm ≃ 4/3 PS, oder 1 PS ≃ ¾ KW.

Zweites Kapitel.

Die verschiedenen Stromarten, Wirkungen im Stromkreise. Instrumente zur Messung von Stromstärke, Spannung und Widerstand.

Wir haben unseren Betrachtungen eine Stromart zugrunde gelegt, die man Gleichstrom nennt. Wie schon der Name andeutet, handelt es sich hier um Strom von bestimmter Richtung, der seine Entstehung einem konstanten Spannungsunterschied an den Klemmen der Stromquelle verdankt. Nimmt die Spannung beständig ab, bis auf Null, so sinkt bei unverändertem Widerstand damit gleichzeitig die Stromstärke (nach dem Ohmschen Gesetz) ebenfalls bis auf Null. Ja, der Vorgang kann sich darüber hinaus abspielen, denn wenn wir etwa in diesem Moment die Zuleitungen an den Polen der Elektrizitätsquelle miteinander vertauschen (kommutieren) und die Spannung wieder anwachsen lassen, so nimmt auch der Strom wieder zu, aber er durchfließt den Leiter nunmehr in entgegengesetzter Richtung, er hat diese gewechselt. Wiederholt sich das Spiel in kurzen Zeiträumen, so tritt auch ständiger Wechsel des Stromes ein, wir haben Wechselstrom. Wir werden später sehen, daß Wechselstrom in der Großtechnik eine weit wichtigere Rolle spielt als Gleichstrom, wir müssen deshalb die wichtigsten Eigenschaften dieser Stromart noch besprechen. Das Wesen des Wechselstromes besteht darin, daß derselbe von einem Nullwerte beginnend stetig ansteigt, einen Höchstbetrag, den Maximalwert erreicht, wieder abnimmt, auf Null sinkt, seine Richtung wechselt, wiederum ein Maximum erreicht, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, um wieder den Anfangswert zu erreichen, worauf ein neuer Zyklus einsetzt. Der reine Wechselstrom folgt bei diesem Vorgang einem bestimmten

Gesetz, das auf der sogenannten Sinusfunktion beruht, man spricht daher auch in der Technik von reinem Sinusstrom im Gegensatz zu jener Stromform, die mehr oder weniger von dem Sinusgesetz abweicht. Das letztere ist bei allen Maschinen der Fall.

Recht anschaulich geht das Wesen von Gleich- und Wechselstrom aus der in Abb. 5 veranschaulichten graphischen Darstellung hervor. Von einem Punkte o aus tragen wir ein Achsenkreuz auf und teilen die beiden Achsen gleichmäßig so ein, daß in der Richtung o—E, in der Richtung der Ordinate, ein Teilstrich einer bestimmten Spannung E entspricht, in der anderen Richtung, der Richtung der Abszisse, sollen die Teilstriche den aufeinanderfolgenden Zeitmomenten t entsprechen. So stelle etwa die Strecke o—T die Zeit von $^1/_{50}$ Sekunde dar. Die Stromstärke wächst mit E und wir sehen, daß zur Zeit t = $^1/_{200}$ Sekunde der Maximalwert Imax erreicht ist, nach $^1/_{100}$ Sekunde ist der Strom = o, nach einem weiteren Viertel hat er das negative Maximum erreicht, um nach $^1/_{50}$ Sekunde eine volle Periode zu vollenden, dann setzt eine neue Periode ein, und man erkennt, daß bei einem regelmäßigen Vorgang eine bestimmte Periodenzahl pro Sekunde resultiert. Die Periodenzahl ist ein technisch sehr wichtiger Begriff, meist beträgt sie 50 pro Sekunde, wie auch in unserem Beispiel angenommen wurde (s. a. S. 42).

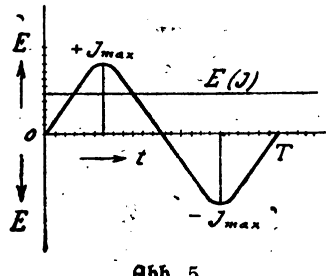


Abb. 5.
Wechselstromkurve.

Ein bestimmter Punkt auf der Strom- oder Spannungskurve in Abb. 5 entspricht einer bestimmten Phase. So haben wir die Phase o, Imax usf. Die Phase des Wechselstromes ist von großer Bedeutung in der Praxis und wir werden öfters Gelegenheit haben, darauf zurückzukommen.

Während in unserem graphischen Bilde die Kurve die sich stetig ändernden Spannungs- resp. Stromwerte vor Augen führt, ergibt die Konstruktion auf Gleichstrom bezogen naturgemäß eine gerade Linie in einem Abstand von der Abszisse, der der konstanten Spannung E resp. der konstanten Stromstärke I entspricht. Wir erkennen nun sofort, daß die Verhältnisse bei Wechselstrom in der Praxis bei weitem nicht so einfach liegen können,

als dies bei Gleichstrom der Fall ist. Denn, wenden wir z. B. das Ohmsche Gesetz an, so bereiten uns zunächst die sich fortwährend ändernden Strom- und Spannungswerte Schwierigkeiten. Diese Impulse müssen aber gleichwohl einen bestimmten Effekt hervorbringen, dessen Größe offenbar von einem mittleren Wert von Strom und Spannung abhängt, von einem Mittelwert nämlich, der demjenigen gleichwertig ist, der unter gleichen Bedingungen dem Gleichstrom zukommen würde. So wird z. B. von einer Glühlampe bei einer bestimmten Netzspannung eine bestimmte Stromstärke verlangt, gleichviel ob es Gleichstrom ist oder ob man Wechselstrom einführt: bei letzterem ist es der Mittelwert aus den veränderlichen Stromwerten, der dem Gleichstrom entspricht, also den Effekt hervorruft, er wird daher Effektivwert der Stromstärke genannt. Das gleiche gilt bezüglich der Spannung. Die Größe der Effektivwerte läßt sich leicht berechnen und es ergibt sich der Satz: Der Effektivwert ist gleich dem Maximalwert dividiert durch die Wurzel aus zwei, wir schreiben dies

$$I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \text{ und } E_{eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \text{ oder,}$$

da $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$ ist, so hat man

$$I_{eff} = I_{max} \times 0{,}707 \quad \text{und} \quad E_{eff} = E_{max} \times 0{,}707.$$

Die Meßinstrumente für Wechselstrom sind so eingerichtet und geeicht, daß sie immer die betreffenden Effektivwerte anzeigen. Diese Größen werden daher auch zugrunde gelegt, wenn wir Berechnungen anstellen, also etwa das Ohmsche Gesetz anwenden wollen.

Die Natur des Wechselstromes bringt noch eine andere Erscheinung mit sich, die außerordentlich beachtenswert ist, auf die wir aber erst später (S. 66) eingehen können.

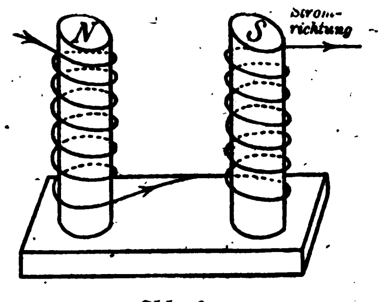


Abb. 6.
Elektromagnet.

Wir wollen jetzt eine Eigenschaft des elektrischen Stromes besprechen, die für dessen Anwendung von der allergrößten Bedeutung ist, nämlich die Fähigkeit, Magnetismus

zu erzeugen. Wickelt man um die durch einen eisernen Fuß verbundenen Kern aus weichem Eisen (Abb. 6) isolierten Draht, durch den man einen Strom hindurch leitet, so zeigt sich, daß dadurch die Kerne magnetisch geworden sind und sich wie ein Stahlmagnet mit den Polen S und N verhalten. Die Stärke des Magnetismus hängt von der Stromstärke und der Zahl der Windungen ab, und zwar von dem Produkt aus beiden. Dieses Produkt bezeichnet man als Amperewindungen, gewöhnlich mit I × m bezeichnet, es ist dies ein wichtiger Begriff im Maschinenbau. Der Magnetismus nimmt aber mit zunehmender Amperewindungszahl nicht unbegrenzt zu, sondern seine Stärke nähert sich einer Grenze, die man Sättigung nennt, ist diese erreicht, so ist eine stärkere Erregung nicht möglich. Andererseits verliert das Eisen nicht vollkommen seinen Magnetismus wieder, nachdem der Einfluß der magnetisierenden Kraft aufhört, es bleiben vielmehr Spuren zurück, eine Erscheinung, die unter dem Namen remanenter Magnetismus bekannt ist.

Jeder Magnet hat bekanntlich zwei Pole und es fragt sich, wovon deren Polarität — das Vorzeichen — abhängt. Darüber gibt folgende Regel Aufschluß: „Blickt man gegen einen Pol (Abb. 6), so ist derjenige ein Südpol, der vom Strome im Sinne des Uhrzeigers umflossen wird". Was die Form der Magnete anbelangt, so kann man, wie beim Stahlmagneten, zwischen stabförmigen Magneten und solchen in Hufeisen- oder ähnlicher Form (Abb. 6) unterscheiden. In der Elektrotechnik wird die letztere meist angewandt, da man dann imstande ist, das Feld beider Pole gemeinsam wirken zu lassen. Unter dem magnetischen Feld verstehen wir denjenigen Bereich, in dem die Kraftwirkung vorhanden ist. Das Feld ist naturgemäß am stärksten in der Nähe der Pole und nimmt mit der Entfernung allmählich ab. Die Kraftverteilung wird durch den Begriff der Kraftlinien anschaulich gemacht, deren Zahl und Richtung für das magnetische Feld charakteristisch ist. Befinden sich zwei ungleichnamige Pole einander gegenüber, wie dies immer bei Hufeisenmagneten der Fall ist, so bilden die Kraftlinien zwischen den Polen und in deren Nähe geschlossene Figuren, darüber hinaus zerstreuen sie sich in die Umgebung, eine Erscheinung, die man Streuung nennt. Abb. 7 a veranschaulicht dies, es ist dort auch durch Pfeile angedeutet, daß man dem Verlauf der Kraftlinien eine bestimmte Richtung zuerteilt und nach

Übereinkunft wird diese vom Nord- zum Südpol angenommen; es ist die Richtung, in der sich ein nordmagnetisches Teilchen unter dem Einfluß der Pole bewegen würde. Abb. b veranschaulicht den Einfluß eines Eisenstücks, das zwischen die Pole gebracht ist. Eisen ist ein sehr guter Leiter des Magnetismus, infolgedessen ziehen sich die Kraftlinien zum Eisen hinüber, sie verdichten sich in den Zwischenräumen, die Streuung ist vermindert. Dies ist von

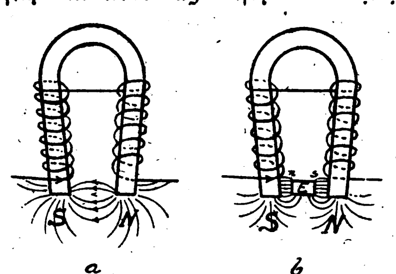


Abb. 7.
Magnetische Kraftfelder.

großer Wichtigkeit für die Praxis, wie wir sehen werden. Das dem magnetischen Feld ausgesetzte Eisenstück wird ebenfalls zum Magneten, solange es dem Einfluß unterworfen ist, es bilden sich an den den erregenden Polen zunächst liegenden Enden ebenfalls Pole mit umgekehrten Vorzeichen aus, man spricht von magnetischer Induktion und das Hinüberziehen der Kraftlinien nennt man Kraftlinien- oder Induktionsfluß. Auch andere Metalle, wie Nickel, Kobalt, vor allem aber gewisse Legierungen des Eisens, werden magnetisch induziert, nur ist die Stärke der Erregung verschieden. Um diese zu kennzeichnen, hat man den Begriff der magnetischen Durchlässigkeit, magnetischen Leitungsfähigkeit oder der Permeabilität eingeführt und versteht darunter die Zahl, die angibt, wieviel Kraftlinien den in das magnetische Feld gebrachten Körper durchsetzen im Vergleich zu der Zahl der Linien, die in demselben Raum vorhanden sind, wenn dieser mit Luft ausgefüllt ist (strenger, wenn sich dort ein luftleerer Raum befindet).

In gewissen Fällen, so namentlich in dem inneren Bereich zwischen den Polen verlaufen die Kraftlinien parallel zueinander und sind pro Flächeneinheit, etwa pro qcm, in gleicher Zahl vertreten; ein derartiges Feld nennt man homogen.[1])

[1]) Es ist zu beachten, daß Kraftlinien in Wirklichkeit nicht existieren, der Begriff trägt aber außerordentlich zur Anschaulichkeit bei und gestattet eine einfache Definition der Feldstärke: pro Flächeneinheit eine bestimmte Zahl der Linien. In Wirklichkeit ist das Feld gleichmäßig vom Magnetismus durchzogen, abgesehen von dem allmählichen Übergang zum schwächeren oder stärkeren Feld.

Wir wenden uns jetzt zur Besprechung der wichtigsten Meßinstrumente und beginnen mit dem Amperemeter. Diese Instrumente geben durch Zeigerausschlag direkt die Stärke des durchfließenden Stromes an, sie müssen daher in denjenigen Stromkreis eingeschaltet werden, in dem der Strom gemessen werden soll. Die einfachen Instrumente, an die keine allzu hohen Ansprüche an genaue Angaben gestellt werden, beruhen auf dem sogenannten Weicheisenprinzip: ein Kern, Bügel, eine exzentrisch gelagerte Scheibe oder dgl. aus weichem Eisen wird infolge der magnetischen Eigenschaften einer von dem zu messenden Strom durchflossenen Spule je nach der Stärke des Stromes mehr oder weniger stark in diese hineingezogen und durch Federwirkung oder infolge der Schwere wieder auf die Nullage zurückgebracht. Dies veranschaulicht schematisch Abb. 8, aus der auch die Art der Schaltung hervorgeht. Die Weicheisenscheibe E ist seitlich mit einer kleinen Achse versehen, die oberhalb der Spule S in Spitzen möglichst reibungsfrei gelagert ist. Die Scheibe mit dem ebenfalls auf der Achse befestigten Zeiger wird durch die auf einer Spindel verschiebbare Regulierschraube M auf der Nullstellung im Gleichgewicht gehalten. Fließt der Strom I durch die Spule, so wird der massigere Teil der Eisenscheibe infolge der nunmehr auftretenden magnetischen Kräfte in das Innere der Spule (auch Solenoid genannt) der Stärke des Stromes entsprechend hineingezogen, also ein bestimmter Zeigerausschlag bewirkt. Die Teilung auf der Skala erfolgt empirisch, d. h. unter Zugrundelegung bekannter Stromwerte. Ist dies für einen bestimmten Instrumententyp geschehen, so werden die Skalen für die Massenfabrikation gedruckt. Instrumente für starke Ströme besitzen Spulen mit dickem Draht und wenig Windungen, umgekehrt werden die Instrumente für schwache Ströme mit entsprechend dünndrähtigen Spulen ausgerüstet, im übrigen kann der Mechanismus unverändert bleiben, ein wichtiger Faktor für die Massenfabrikation.

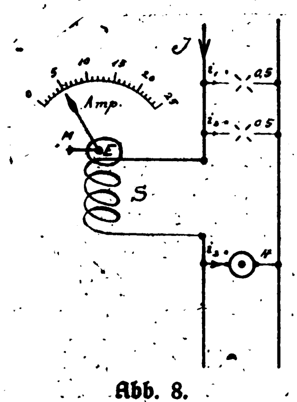


Abb. 8.
Amperemeterschaltung.

Abb. 13. Milliampere-Millivoltmeter mit Nebenschlüssen zur Erweiterung des Meßbereichs für die Stromstärke.



Abb. 74. Motorzähler der A. E. G.

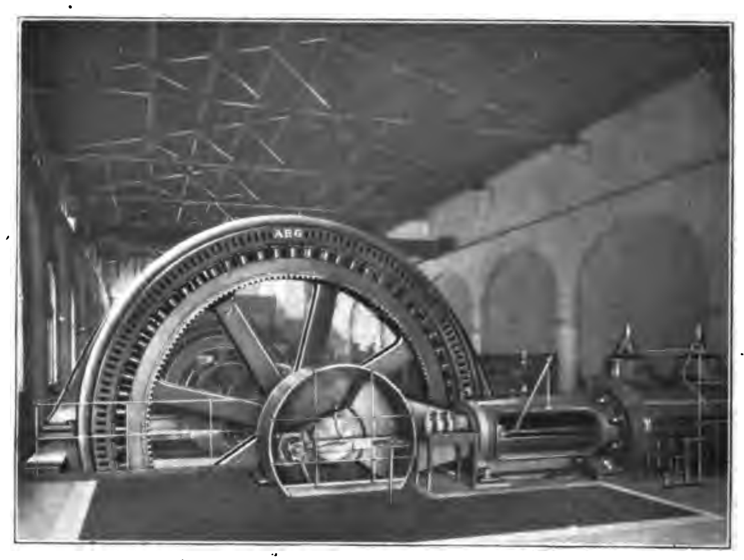


Abb. 35. Wechselstrommaschine der A. E. G. von 1450 KVA Leistung.



Abb. 36. Turbinengeneratoren der S S W. von je 6250 KVA Leistung.

Die Schaltung der Amperemeter erfolgt stets so, daß der zu messende Strom das Instrument durchfließt, dieses wird also in den Stromkreis geschaltet, nicht parallel dazu. Bei der aus der Skizze in Abb. 8 ersichtlichen Schaltung mißt man den Hauptstrom I, der gleich ist der Summe der Zweigströme i_1, i_2 und i_3. Will man die Stärke eines Zweigstromes allein ermitteln, etwa die des Motors i_3, so schaltet man natürlich das Amperemeter in diesen Zweig, man würde dazu aber ein Instrument nehmen, dessen Meßbereich der zu messenden Stromstärke angepaßt ist.

Abb 9 veranschaulicht ein Weicheiseninstrument der Firma Siemens u. Halske. Die durchsichtige Skala gestattet einen Einblick in das Innere, man erkennt oben links die rechteckigeSpule, rechts davor die ovale Weicheisenscheibe. Weiter erblickt man ein gebogenes, zur Zeigerachse konzentrisch gelagertes kurzes Röhrenstück. In dieses taucht eine Art Kolben, der sich dort reibungslos bewegt und durch einen Arm mit der Zeigerachse verbunden ist. Diese Einrichtung dient zur Dämpfung, indem durch die Luftverdrängung ein schnelles Abklingen der Schwingungen erreicht wird. Derartige Systeme nennt man aperiodisch.

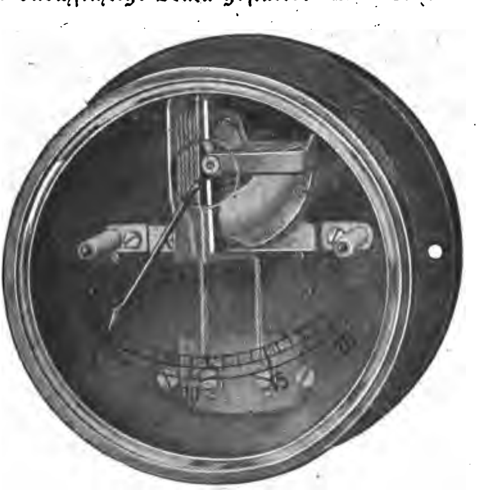


Abb. 9.
Amperemeter, Weicheiseninstrument.

Das dargestellte Instrument ist zur festen Montage auf der Schalttafel bestimmt. Für transportable Zwecke, auf Montage, im Laboratorium und in ähnlichen Fällen ist das Instrument in einen Holzkasten eingebaut, der mit einem Griff oder Tragriemen ausgerüstet ist.

Die Weicheiseninstrumente sind billig in der Anschaffung, verhältnismäßig unempfindlich gegen unsanfte Behandlung sowie

gegen vorübergehende Überlastung durch zu starken Strom, ferner besitzen sie den Vorzug, unabhängig von der Stromart zu sein, sie eignen sich also für Gleich- wie auch für Wechselstrommessungen. Ihre Angaben sind freilich, wie schon erwähnt, nur mäßig genau, so daß für exakte Messungen nur die sogen. Präzisionsinstrumente in Betracht kommen.

Da die Entwicklung der Elektrotechnik immer höhere Ansprüche an die Meßverfahren stellt, so sind die Präzisionsinstrumente von größter Wichtigkeit im Laboratorium wie im technischen Betrieb, es sei deshalb im folgenden etwas näher darauf eingegangen. Die Instrumente beruhen auf dem sogenannten Drehspulprinzip, wobei wir aber unterscheiden müssen zwischen Instrumenten zur Messung von Gleichstrom und solchen für Wechselstrom, insofern nämlich sich die Gleichstrominstrumente nicht für Wechselstrom eignen.

Das Drehspulprinzip beruht darauf, daß eine vom Strome durchflossene Spule, die leicht drehbar gelagert ist, eine Drehung — Ablenkung — erfährt, wenn sie der Einwirkung eines magnetischen Feldes ausgesetzt ist (bei Gleichstrom) oder, wenn sie sich in der Nähe einer vom nämlichen Strome durchflossenen Spule befindet (bei Gleich- und Wechselstrom). Die Spule muß natürlich zum Felde richtig orientiert sein. Den Aufbau des Gleichstrominstrumentes soll Abb. 10 erläutern. Der Drahtbügel B ist, wie angedeutet, bei L_1 und L_2 in feinen Spitzen gelagert. Anfang und Ende des Bügels sind an die Spiralfedern s_1 und s_2 angelötet, durch die der Strom I durch den Bügel gelangen kann, während derselbe eine Drehung ausführt. Infolge der richtenden Kraft der Federn wird dem Drehsystem eine bestimmte Ruhelage erteilt. Das System befindet sich zwischen den Polen eines kräftigen Hufeisenmagneten, dessen Kraftlinien vom Nord- zum Südpol verlaufen. Nach dem elektromagnetischen Grundgesetz findet nun eine Kraftwirkung zwischen den Magnetpolen und dem stromdurchflossenen Leiter statt, unter deren Ein-

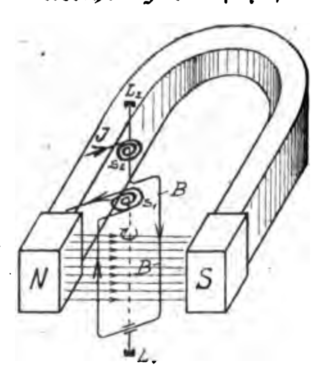


Abb. 10.
Drehspulinstrument.

wirkung sich der Leiter nach der „Linken Handregel" bewegt: „Bringt man den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der Kraftlinien (N → S), den Mittelfinger in die Richtung des Stromes, so gibt der Daumen die Richtung der Bewegung des Leiterstückes an".

Da die Wirkung mit der Stärke des Magnetfeldes und der Anzahl der Leiter zunimmt, so bildet man den Bügel zu einer meist rechteckigen Spule aus dünnem Drahte aus und lagert diese so, daß die gegenüberliegenden Spulenteile den schmalen Raum einnehmen, der zwischen den ausgebohrten Polansätzen

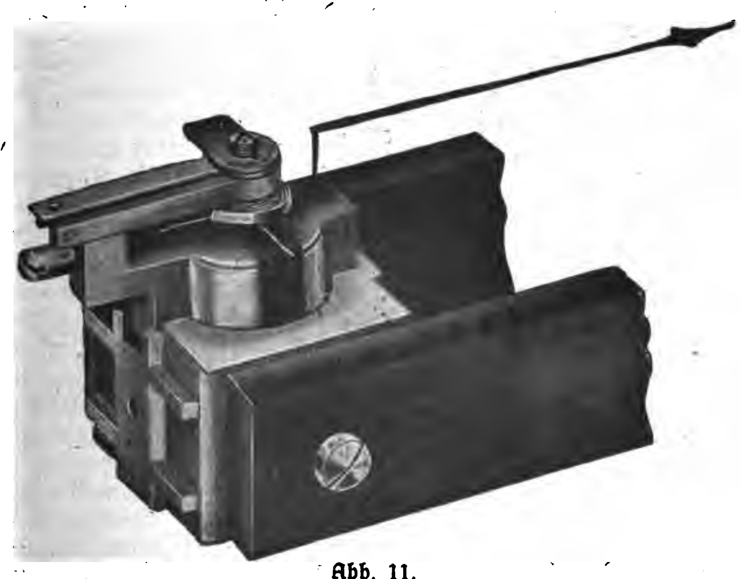


Abb. 11.
Mechanismus des Drehspulinstruments.

und einem konzentrisch gelagerten Eisenkern besteht. Dies führt uns Abb. 11 an einem Fabrikat der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft Berlin[1]) vor Augen: man erkennt unter der Spirale die Spule, gegen die sich der Polansatz und der zylindrische Eisenkern hell abheben, auch ist der halbringförmige schmale Schlitz

[1]) Bekannt unter der Abkürzung: A. E. G. Diese Bezeichnung ist im folgenden immer angewandt.

deutlich sichtbar, der die Stromspule aufnimmt. In diesem Raum findet eine starke Verdichtung der magnetischen Kraftlinien statt, die von den Polen des Stahlmagneten ausgehen.

Neben großer Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit in den Angaben besitzen die Drehspulinstrumente noch weitere wesentliche Vorteile. Da das Magnetfeld in dem Spulenraum praktisch homogen und die Spannung der Spiralfedern der ablenkenden Kraft proportional ist, so ist auch die Ablenkung der Nadel der Stromstärke proportional, d. h. das Zifferblatt besitzt gleichmäßige Teilung. Diese Eigenschaft ist deshalb wertvoll, weil die Ablesegenauigkeit bei schwachen Strömen ebenso groß ist wie bei starken. Die Drehspulinstrumente besitzen ferner sehr gute Dämpfung, sie sind aperiodisch. Diese Dämpfung beruht auf einer eigentümlichen Erscheinung, die wir später bei Besprechung der Induktionsströme (S. 31) noch näher kennen lernen werden; man spricht auch von Kupferdämpfung. Ein weiterer Vorteil bei diesem Instrumententyp beruht darin, daß die Angaben nicht durch starke Magnetfelder oder stromführende Leiter in der Nachbarschaft beeinflußt werden, da deren Einwirkung dem starken Eigenfeld gegenüber verschwindet.

Es möchte scheinen, als ob die Drehspulinstrumente, deren wesentlicher Teil aus einer leichten Spule mit dünndrähtiger Wicklung besteht, nur für schwache Ströme geeignet wären. Das ist indessen nicht der Fall. Gerade dieser Instrumententyp eignet sich wie kein anderer zum Messen schwacher, aber auch der stärksten Ströme. Diese Möglichkeit beruht auf der Anwendung der Stromverzweigung. Schaltet man nämlich nach Abb. 12 parallel zum schematisch dargestellten Amperemeter A den Nebenschluß N, so ist, wie auf Seite 7 besprochen, $I = i_1 + i_2$, der Hauptstrom gleich der Summe der Zweigströme. Daraus folgt, daß der Instrumentenstrom i_1 um so kleiner ist, je größer der Zweigstrom i_2 ist, d. h. je kleiner der Widerstand des Nebenschlusses ist. Wir haben ferner früher gesehen, daß bei der Stromverzweigung die Zweigströme sich umgekehrt verhalten wie die Widerstände der Zweige, in denen sie fließen, also nach der Abbildung

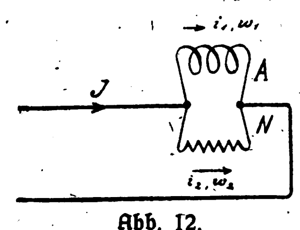


Abb. 12.
Nebenschluß zur Erweiterung des Meßbereichs.

$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1}$. Ist z. B. $w_1 = 1$ Ohm, $w_2 = 1/_9$ Ohm, so haben wir: $\frac{w_1}{w_2} = \frac{1}{1/_9} = \frac{i_2}{i_1}$, darnach ist $i_2 = \frac{i_1}{1/_9} = 9\,i_1$. Da aber der Hauptstrom I, dessen Stärke gemessen werden soll, gleich ist der Summe der Zweigströme, so ist auch, wenn wir für i_2 den Wert $9\,i_1$ einsetzen $I = i_1 + 9\,i_1 = 10\,i_1$, oder $i_1 = 1/_{10}\,I$. Wir kommen also zu dem wichtigen Ergebnis, daß der Instrumenterstrom gleich ist $1/_{10}$ des Hauptstromes, wenn der Nebenschlußwiderstand 9mal kleiner ist als der des Instrumentes, eine gleichlaufende Rechnung zeigt uns, daß der Instrumentenstrom $= \frac{1}{100} = \frac{1}{1000} = \frac{1}{10000}$ usf. des Hauptstromes ist, wenn man den Nebenschluß entsprechend auf $\frac{1}{99}, \frac{1}{999}, \frac{1}{9999}$ usf. von w_1 abgleicht.

So hat man also ein wichtiges und einfaches Mittel, den Meßbereich für ein und dasselbe Instrument beliebig zu erweitern. Ohne Nebenschluß ist häufig das Präzisionsinstrument für Milliampere $= \frac{1}{1000}$ Ampere geeicht: Milliamperemeter; die Skala umfaßt dabei 150 Teilstriche.

Abb. 13 auf Tafel I veranschaulicht ein kombiniertes Milliampere-Millivoltmeter der A. E. G. für Montage und Laboratoriumszwecke. Als Amperemeter dient es zur Messung von 0 bis 0,15; 3; 7,5; 15; 30; 75; 150; 300 Ampere, je nach Wahl der oben im Karstendeckel untergebrachten Nebenschlüsse, die an entsprechend bezeichnete Klemmen angeschlossen werden.



Abb. 14. Wirkung gekreuzter Ströme aufeinander.

Für die Messung von Wechselstrom eignen sich die Drehspulinstrumente mit Stahlmagnet nicht, weil die Drehspule infolge des ständigen Wechsels der Stromrichtung bald nach rechts, bald nach links abgelenkt werden würde, so daß überhaupt keine Bewegung eintritt. Hier hilft die Anwendung des elektrodynamischen Grundgesetzes von Ampère, welches u. a. besagt, daß auf zwei sich kreuzende Leiter l_1 und l_2, Abb. 14, die vom Strom I durchflossen werden, so daß dieser

zur Kreuzungsstelle hinfließt, eine Kraft einwirkt, die die einzelnen Leiter parallel zueinander zu stellen sucht und daß ferner zwei gleichgerichtete Ströme einander anziehen mit einer Kraft, deren Größe dem Quadrat der Stromstärke proportional ist. Denken wir uns nun den einen Leiter zu einer Drehspule ausgebildet, den anderen als feststehende Spule, in deren Inneren die andere frei schwingen kann, ferner beide hintereinander geschaltet, so findet Ablenkung durch den Strom I statt, wenn die Windungsebenen beider Spulen senkrecht aufeinander stehen, wie dies das Schema in Abb. 15 veranschaulicht. Die auf Spitzen gelagerte Drehspule S_1 (in der Abb. ist nur eine Windung eingezeichnet) würde sich bei der gezeichneten Stromrichtung gegen die feste Spule S_2 um einen bestimmten Winkel drehen.

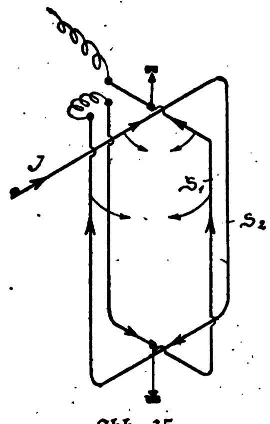


Abb. 15.
Prinzip des Elektrodynamometer.

Außer den beschriebenen Instrumenten kommen für Präzisionsmessung noch die Hitzdrahtamperemeter in Betracht, die sich gleich gut für Gleichstrom wie für Wechselstrom eignen, meist aber nur für die letztere Stromart in Anwendung kommen. Diese Instrumente beruhen auf dem Gesetz über die Stromwärme von Joule, das, wie wir schon gesehen haben, besagt, daß in einem Leiter vom Widerstand W, der vom Strome I durchflossen wird, stets Wärme auftritt, und daß die Wärmemenge Q proportional ist dem Quadrate der Stromstärke und dem Widerstand: Q prop. $I^2 \times W$. Ein feiner Draht aus Platin-Iridium (oder

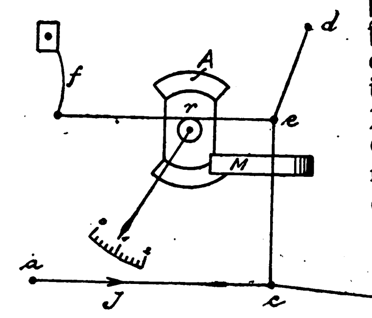


Abb. 16.
Hitzdrahtinstrument.

Platin-Silber) ist an den Stellen a und b, Abb. 16, eingeklemmt, dort erfolgt auch die Stromzuführung. Ein zweiter Draht ist bei c mit dem Hitzdraht verbunden und andererseits bei d eingeklemmt, während ein dritter Draht bei e angreift, um die mit der Zeigerachse verbundene Rolle r geschlungen ist und durch die Feder f angespannt wird. Man erkennt leicht, daß bei Erwärmung des unteren Drahtes, also des Hitzdrahtes, infolge dessen Dehnung die Feder in Funktion tritt, den Spanndraht heranzieht und so die Rolle dreht, womit ein entsprechender Zeigerausschlag verbunden ist. Damit die Ruhelage schnell erreicht wird, das Instrument also aperiodisch wirkt, ist auf der Zeigerachse eine leichte Aluminiumscheibe A befestigt, die zwischen den eng gestellten Polen des Magneten M schwingt: die entstehenden Induktionsströme (s. a. S. 31) bewirken eine gute Dämpfung.

Zur Erweiterung des Meßbereichs werden die Hitzdrahtinstrumente wie die vorigen auch mit Nebenschlüssen ausgerüstet.

Damit haben wir die wichtigsten Instrumententypen zur Strommessung besprochen, jetzt müssen wir uns denjenigen Instrumenten zuwenden, die zur Spannungsmessung dienen. Da auch hier, abgesehen von den elektrostatischen Instrumenten, die ablenkende Wirkung des Zeigers durch den elektrischen Strom hervorgerufen wird, so können wir uns kurz fassen: Die Spannungszeiger unterscheiden sich von den Stromzeigern nur hinsichtlich der stromführenden Teile und der Schaltung. Was diese anbetrifft, so verbindet man die Klemmen des Instrumentes mit denjenigen Stellen der Leitung, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll. So mißt man z. B. nach Abb. 17 die Netzspannung von 220 Volt zwischen den Punkten a und b. Während aber bei dem Amperemeter der Hauptstrom I durch die Spule des Instrumentes hindurchgeleitet wird, fließt hier der Zweigstrom i durch die Spule, die aus sehr vielen dünndrähtigen Windungen besteht, also einen hohen Widerstand besitzt. Dadurch erreicht der Zweigstrom einen nur

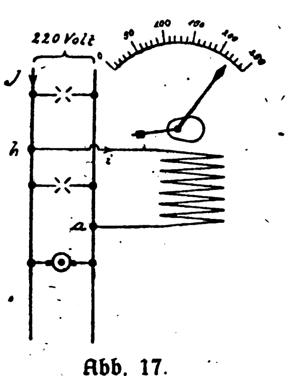


Abb. 17.
Voltmeterschaltung.

verschwindend kleinen Wert, was ja angestrebt werden muß, um Stromverluste durch Einschalten des Instruments zu vermeiden; trotzdem ist die magnetische Wirkung hinreichend groß, da diese, wie wir gesehen haben, von der Zahl der Amperewindungen abhängt.

Auch die Voltmeter gestatten die Ausdehnung des Meßbereichs in beliebig weiten Grenzen. Will man beispielsweise das auf S. 21 beschriebene Milliampere-Millivoltmeter, ein Instrument, das normalerweise bis 150 Millivolt anzeigt, für den doppelten Meßbereich einrichten, so hat man nur nötig, einen Vorschaltwiderstand einzuschalten, der genau so groß ist, wie der Widerstand des Instrumentes: da i unverändert bleiben muß, denn der Zeigerausschlag hängt nur von dieser Größe ab, so hat man nach dem Ohmschen Gesetz $150 = i \times w$, und $300 = i \times 2\,w$. Die Erweiterung des Meßbereichs könnte man so beliebig weit fortführen, der Isolationsschwierigkeiten halber wird indessen die Grenze von etwa 5000 Volt nicht überschritten. Für höhere Spannungen benutzt man die elektrostatischen Instrumente, die sich durch sehr einfachen Bau auszeichnen. Diese Instrumente sind dem in der Physik gebräuchlichen Elektrometer nachgebildet, die Einrichtung erläutert Abb. 18 (A. E. G.). Durch die Klemmvorrichtung bei c wird das Instrument an die spannungsführende Leitung angeklemmt. Die der Spannung entsprechende elektrische Ladung teilt sich den Brücken d und e, sowie dem zwischen diesen bei a gelagerten drehbaren Flügel b mit. Ist keine Spannung vorhanden, so steht der Flügel senkrecht, mit zunehmender Spannung dreht er sich jedoch infolge der elektrostatischen Abstoßung der gleichnamig geladenen Teile bis zur horizontalen Lage. Da die Größe des Ausschlages ein Maß für die Spannung ist, so kann man hinter dem Flügel eine Skala anbringen, die auf Volt geeicht ist.

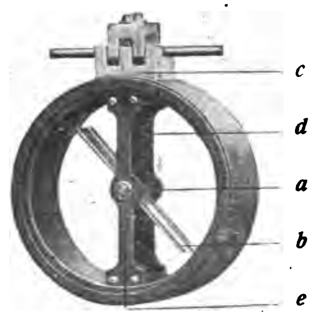


Abb. 18.
Elektrostatisches Voltmeter.

Außer den Ampere und Voltmetern hat man Instrumente konstruiert, die unter dem Namen Wattmeter und Leistungsmesser bekannt sind und das Produkt aus Strom und Spannung

direkt angeben, bei den Leistungsmessern noch unter Berücksichtigung des sog. Leistungsfaktors (s. S. 65). Es sind Elektrodynamometer, wie auf Seite 22 beschrieben, deren bewegliches System aber als Nebenschlußspule ausgebildet ist, also aus vielen Windungen dünnen Drahtes besteht. Der Hauptstrom durchfließt die dickdrähtige feste Spule, während die Spannung an den Enden der Nebenschlußspule liegt. Da der Strom in dieser Spule von der Spannung abhängt, so ist die ablenkende Kraft direkt dem Produkt aus Stromstärke und Spannung proportional.

Es bleibt uns jetzt noch zu besprechen, wie man die dritte Fundamentalgröße, nämlich den Widerstand einer Leitungsanlage ermittelt. In der Technik geschieht dies meist indirekt unter Zugrundelegung des Ohmschen Gesetzes. Soll z. B. der Widerstand w der in eine Leitung eingeschalteten Glühlampe gemessen werden, so legt man hier das Voltmeter V an (Abb. 19) und liest die Spannung E ab, während das Amperemeter A die Stromstärke I anzeigt.

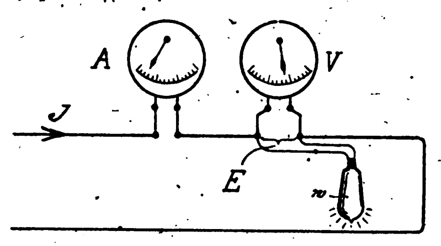


Abb. 19.
Ermittelung eines Widerstandes.

Wir haben dann $w = \frac{E}{I}$.

Es gibt aber auch Instrumente, die direkt die Ohmwerte durch Zeigerausschlag angeben: Ohmmeter. Diese Instrumente werden fast ausschließlich auf Montage benutzt und dienen dazu, sehr hohe Widerstände zu messen, wie sie bei Isolationsstörungen auftreten; sie sind deshalb auch unter dem Namen Isolationsmesser bekannt. Zum Gebrauch ist eine Hilfsspannung erforderlich, die für ein bestimmtes Instrument einen vorgeschriebenen Wert hat. Meist dient dazu die Netzspannung von 110 oder 220 Volt, oder man erzeugt sie selbst mittelst eines sogenannten Kurbelinduktors (wie beim Telephon). Die Leitung ist vor der Messung an irgendeiner Stelle zu unterbrechen und stromlos zu machen. Wir denken uns die Hilfsspannung zwischen den Punkt a und eine Klemme des Instruments gelegt (vgl. Abb. 17), während die andere Klemme mit dem Punkt b verbunden ist (das Volt-

meter ist zu entfernen!). Der Ausschlag muß außer von der Spannung noch vom Widerstand im Stromkreise zwischen a und b abhängen, man kann daher die Skala direkt in Ohm teilen.

Drittes Kapitel.

Die Starkstromquellen der Elektrotechnik, der Gleichstromgenerator, der Wechselstromgenerator.

Das eifrige Studium des Zusammenhangs zwischen den magnetischen und elektrischen Erscheinungen führte zu einem Gesetz, wie es wichtiger für die Starkstromtechnik kaum gedacht werden kann: dem Induktionsgesetz. Darüber gaben Aufschluß jene grundlegenden Versuche von Faraday, deren Bedeutung in dem Satze gipfelt: „In jedem geschlossenen Leiter entsteht ein Strom, wird ein elektrischer Strom induziert, wenn man den Leiter durch ein magnetisches Kraftfeld hindurch bewegt, so daß Kraftlinien geschnitten werden". Dieser Strom entsteht infolge der induzierten elektromotorischen Kraft im Leiter. Die Versuche haben gezeigt, daß die Höhe dieser Kraft von der Stärke des Magnetfeldes, von der Länge des der Induktion ausgesetzten Leiters und von der Geschwindigkeit, mit der der Leiter durch das Feld bewegt wird, abhängt. Im Sinne des Kraftlinienbegriffs kann man auch kurz sagen: die elektromotorische Kraft nimmt mit der Zahl der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien zu oder ab. Um die höchste Wirkung zu erzielen, muß der Leiter senkrecht zu den Kraftlinien stehen und senkrecht zu diesen bewegt werden.

Auf Grund der gewonnenen Erkenntnis entstanden zuerst die magnetelektrischen Maschinen, die Vorläufer jener Stromerzeuger, die wir heute Dynamomaschinen oder Generatoren nennen, und die durch irgendeine Kraft angetrieben, elektrischen Strom zu liefern vermögen.

Indem wir uns das Induktionsgesetz vor Augen halten, wird es uns leicht, den Mechanismus und die physikalische Bedeutung der ersten magnetelektrischen Maschine zu verstehen: zwei Dinge sind es, die hier stets zusammenwirken, nämlich Magnetfeld und Leiter. Die erste brauchbare Maschine für Gleichstrom konstruierte

der Belgier **Gramme**[1]). Gramme war ursprünglich Modellschreiner in einer Pariser Fabrik für Apparatebau. Als findiger Kopf nutzte er die dort gewonnene Anregung geschickt aus und wurde so u. a. der Erfinder des in der Elektrotechnik wohlbekannten **Grammeschen Ringes**. Diesen Grammeschen Ring wollen wir unseren Betrachtungen zunächst zugrunde legen, um das Prinzip der Stromerzeuger kennen zu lernen. Dazu halten wir uns an die schematische Darstellung in Abb. 20. Darnach ist das Magnetfeld N—S dadurch erzeugt, daß die Polansätze P_1 P_2, meist aus Gußeisen, mit dem Stahlmagneten M fest verbunden sind. Die Polansätze sind zylindrisch ausgebohrt und konzentrisch dazu

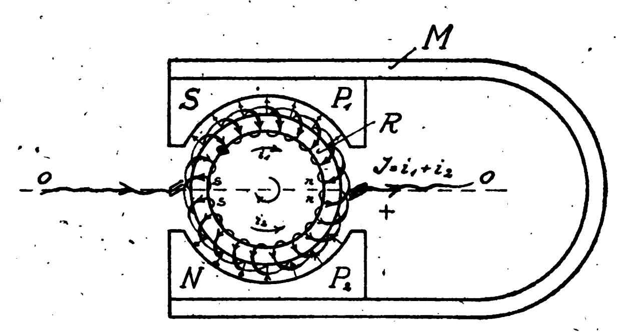


Abb. 20.
Wirkungsweise des Grammeschen Rings.

ist der eiserne Ring R gelagert, der mittelst einer Achse in Rotation versetzt werden kann. Der Ring ist mit isoliertem Draht bewickelt, derartig, daß dessen Anfang in das Ende zurückläuft, so daß eine endlose Wicklung entsteht, wie dies die Zeichnung schematisch darstellt. Wegen der guten magnetischen Leitfähigkeit des Eisenringes ziehen sich die Kraftlinien zu ihm hinüber (s. d. Pfeile) und füllen in verdichteter Form den engen Luftspalt zwischen Polschuhen und Ring. In diesem starken Felde befinden sich die Drahtwindungen, die bei Rotation des Ringes die Kraftlinien schneiden, so daß ein Strom in jeder Windung entsteht. Da die Windungen hintereinander geschaltet sind, so summieren sich die einzelnen Teilströme und bilden den Strom i.

[1]) Gramme hatte mit dem Italiener Pacinotti die Idee gemeinsam, in der konstruktiven Durchführung war er aber erfolgreicher.

Diese Vorgänge spielen sich in beiden Ringhälften ab, da aber die Ströme von entgegengesetzten Feldern induziert werden, so muß auch ihre Richtung entgegengesetzt sein, es entstehen also Ströme i_1 und i_2, die beide von den beiden Stellen s s ausgehend sich an den gegenüberliegenden Stellen n n vereinigen, so wie es bei jeder Stromverzweigung der Fall ist. An den Stellen s s und n n müssen also Zuleitungen bestehen, die den Kontakt unterhalten, während sich der Ring dreht. Dazu können Metallbürsten dienen, die mit leichtem Druck die Drahtlagen außen berühren, wobei natürlich die Isolation auf den Rücken der Drähte entfernt sein muß. Das bietet aber für die Praxis Schwierigkeiten und würde leicht zu Isolationsstörungen führen. Man ordnet deshalb auf dem Ring Spulen an, die man mit je Anfang und Ende unter sich verbindet, so daß man eine fortlaufende Leitung erhält, genau so, wie in dem zuerst angenommenen Falle. Mit dem Ring ist, wie Abb. 21, die einen Teil des Ringes darstellt, veranschaulicht, ein besonderer Maschinenteil verbunden, den man **Kollektor** (Sammler) oder **Kommutator** (Stromwender) nennt. Dieser Kommutator besteht aus ebensoviel kupfernen Lamellen l wie Spulen vorhanden sind. Die Lamellen sind gegeneinander gut isoliert und bilden einen zylinderförmigen Körper. Jede Lamelle ist mit Anfang und Ende zweier benachbarter Spulen verbunden. Die Bürsten, von denen eine eingezeichnet ist (B), liegen da auf, wo die Ströme sich verteilen resp. wo sie zusammenlaufen, in der sogenannten neutralen Zone. Diese ist in Abb. 20 mit o—o bezeichnet; hier vereinigen sich die Zweigströme zum Hauptstrom: $i_1 + i_2 = I$.

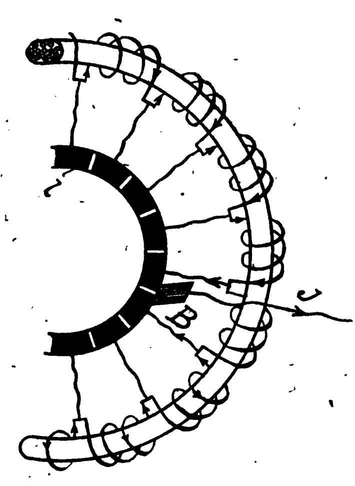


Abb. 21.
Stromabnahme vermittels des Kommutators.

Der Grammesche Ring ist heute kaum noch in Gebrauch, er ist durch den **Trommelanker** verdrängt. Der Ring besitzt

nämlich den Nachteil, daß die an der inneren Peripherie verlaufenden Drahtlagen der Spulenwicklung nicht induziert werden, denn in diesem Raum befinden sich keine magnetischen Kraftlinien; da sie im Innern des Eisenringes verlaufen. Aber selbst wenn die Kraftlinien des Feldes auch diesen Raum durchsetzten, so könnte man sie nicht verwerten, denn sie würden Ströme in den inneren Windungen erzeugen, die denen in den äußeren Drahtlagen entgegenlaufen, beide würden sich aufheben, die Maschine wirkungslos sein. Die inneren Windungen bedeuten daher einen unnötigen Materialaufwand und überflüssigen Ballastwiderstand; auch ist, wie man sich leicht vorstellen kann, die Bewicklung des geschlossenen Ringes schwierig.

Diese Übelstände vermeidet der Trommelanker, dessen Grundgedanke von Siemens und dessen Chefkonstrukteur von Hefner-Alteneck stammt. Es entstand zunächst der Doppel-T-Anker. Abb. 22 stellt den Durchschnitt einer Maschine mit Doppel-T-Anker dar. Der Anker hat die Form eines doppelt T; in die Aussparungen sind die Drahtlagen, wie in der Abb. angedeutet, eingewickelt wie auf einen länglichen Spulenkern, und da sie immer entgegengesetzte Felder passieren, so werden sie auch von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen, deren Wirkung sich wie die Ströme in den gegenüberliegenden Teilen einer Spule summiert. Anfang und Ende der Spule sind zu Kommutatorsegmenten geführt, deren hier natürlich nur zwei vorhanden sind, und an denen auch die Abnahme des Stromes stattfindet.

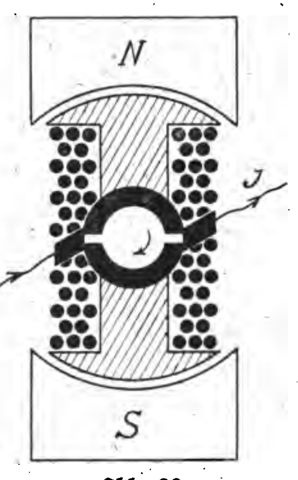


Abb. 22.
Siemensscher Doppel-T-Anker.

Die Stromabnahme an nur zwei Segmenten ist indessen unvollkommen, denn es entstehen bei der Stromabgabe merkliche Schwankungen, indem bei jeder Umdrehung der Strom von einem 0-Werte bis zum Maximalbetrage ansteigt, man spricht von pulsierendem Gleichstrom. Je mehr Segmente (Lamellen)

vorhanden sind, um so mehr verschwindet diese Ungleichförmigkeit und in dem Bestreben, in diesem Sinne zu verbessern, entstand als weiterer Ausbau des Doppel-T-Ankers der Trommelanker. Wir gelangen leicht vom Doppel-T-Anker zum eigentlichen Trommelanker, indem wir uns einen zylindrischen Eisenkörper mit einer großen Zahl von Längsnuten vorstellen und entsprechend vermehrter Zahl von Spulen. In Abb. 23 ist der Nutenanker schematisch veranschaulicht und der besseren Übersicht halber nur einige Nuten eingezeichnet, desgleichen ist, um die Übersicht nicht zu stören, nur eine Nute bewickelt dargestellt. In Wirklichkeit verteilen sich die

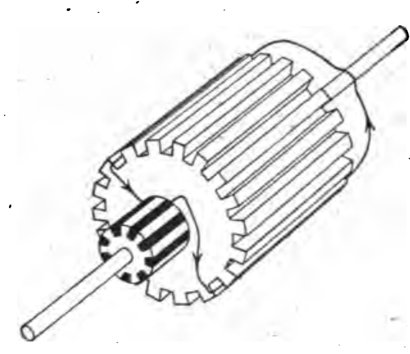


Abb. 23.
Trommelanker.



Abb. 24.
Nutenanker einer Gleichstrommaschine.

Nuten mit der eingebetteten Wicklung in großer Zahl um den ganzen Ankerumfang herum. Wie man sieht, sind auch hier Anfang und Ende zweier benachbarter Spulen mit je einem Kommutatorsegment verbunden, man erkennt aber, daß die Drahtlagen

der Wicklung bei weitem besser ausgenutzt sind, als beim Ring. Abb. 24 veranschaulicht den Anker einer Gleichstrommaschine der A. E. G. Man sieht die in Nuten eingebetteten Drahtlagen, rechts den Kommutator mit zahlreichen Segmenten, links ein Flügelrad zur Ventilation und Abführung der im Betriebe auftretenden unvermeidlichen Jouleschen Wärme. Da die bei der hohen Tourenzahl auftretende Fliehkräfte beträchtlich sind, so werden die Drahtlagen durch herumgelegte Bänder vor dem Herausschleudern geschützt.

Was den eigentlichen Ankerkörper anlangt, so hatte Gramme diesen bei seiner Maschine aus ausgeglühten Eisendrähten hergestellt, die er zu einem Ring aufspulte; dies ist in Abb. 21 an der Schnittfläche angedeutet. Heute stellt man den Eisenkern aus den sogenannten legierten Blechen zusammen. Es ist dies eine Eisensorte mit 4—5% Siliziumzusatz. Diese Maßnahme hat den Zweck, den „Eisenverlust" der Maschine auf ein Minimum zu beschränken. Zunächst ist klar, daß im Ankereisen aus demselben Grunde Ströme erzeugt werden, wie in den aufliegenden Windungen, da ja die Metallmassen im veränderlichen Magnetfeld rotieren. Diese Ströme wurden von Foucault näher untersucht und von ihm Wirbelströme genannt, da sie nicht in einem Leiter entstehen, in dem sie eine bestimmte Richtung annehmen, sondern in der ausgedehnten Masse des Metallkörpers hin und her wirbeln. Nun ist zunächst das Material der legierten Bleche ein schlechter Leiter für Elektrizität, die Wirbelströme treten daher nicht so stark auf; um aber den Widerstand noch zu vergrößern, wird eine große Zahl dünner Bleche, die durch gefirnißtes Seidenpapier gegeneinander isoliert sind, aufeinandergepreßt und durch eiserne Schlußstücke zu einem festen Körper vereinigt. Die magnetischen Kraftlinien, die radial verlaufen, finden dadurch keinen erhöhten Widerstand.

Ein weiterer Verlust, durch das Ankereisen bedingt, liegt in der sogenannten Hysteresis. Man versteht darunter die Erscheinung, daß Eisen, welches einem magnetischen Einfluß unterworfen wird, nicht sogleich wieder seinen Magnetismus verliert in dem Augenblick, wo die magnetisierende Kraft aufhört, vielmehr erst nach einiger Zeit, daß der Magnetismus also nachbleibt, bis der konstante Zustand des remanenten Magnetismus (s. S. 14) erreicht ist. Um dieses Nachbleiben zu verhindern, muß eine Gegenwirkung auftreten, die den Magnetismus sofort zum Verschwinden

bringt. Bedenkt man, daß in kurzen Zeiträumen die Teile des Ankers bald vom Nordfeld, bald vom Südfeld magnetisiert werden, und daß der Übergang durch den nicht magnetischen Zustand führt, so sieht man leicht ein, daß ein gewisser Energieaufwand zur jedesmaligen Entmagnetisierung notwendig wird, und daß dieser Aufwand um so geringer ausfällt, je kleiner die Hysteresis ist.

Auch hier schafft das legierte Blech Abhilfe, indem der erwähnte Einfluß bei dieser Eisensorte sich nur in engen Grenzen geltend machen kann.

Wir haben uns eingehend mit den Gesichtspunkten beschäftigt, die beim Bau des Ankers zu berücksichtigen sind, nunmehr müssen wir den nicht minder wichtigen Teil der Maschine, das Magnetgerüst näher betrachten. Den einfachen, offenen Magnet, den wir der besseren Übersicht halber bisher unseren Betrachtungen zugrunde legten, finden wir nicht mehr bei den modernen Maschinen, die offene Bauart ist vielmehr durch die völlig geschlossene Form verdrängt worden. Unter offener Bauart verstehen wir jene Anordnung, bei der die Pole frei im Raume endigen, wie dies bei jedem Hufeisenmagneten der Fall ist. Hier verlaufen die das Kraftfeld bildenden Kraftlinien zum Teil im freien Raum, wie wir dies an Abb. 7 gesehen haben, sie verlieren sich dort. Dieser Teil der magnetischen Kraft geht offenbar für die Stromerzeugung verloren. Schließt man dagegen die beiden Pole durch einen geschlossenen Ring, wie dies Abb. 25 schematisch zeigt, so verlaufen auch die magnetischen Kraftlinien fast ausnahmslos im Innern des Eisenkörpers, der ihnen ja auch, wie früher bereits erläutert, einen viel geringeren Widerstand bietet. So füllen sie auch den engen Raum zwischen Polansatz und Ankereisen, den sogen. Luftspalt kräftig aus und erhöhen entsprechend die induzierende Wirkung auf die den Luftspalt passierenden Drahtlagen. Den durch die eingezeichnete Linie dargestellten Verlauf der Kraftlinien nennt man Induktionsfluß.

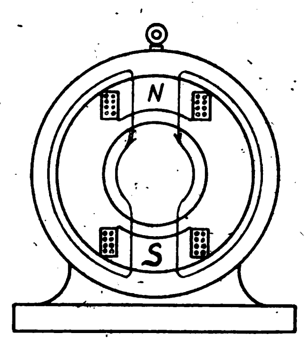


Abb. 25.
Geschlossenes Magnetgehäuse.

Eine Frage ist bis jetzt noch offen geblieben: wie wird der



Abb. 58. Lokomotivmotor für Vollbahn der A. E. G.

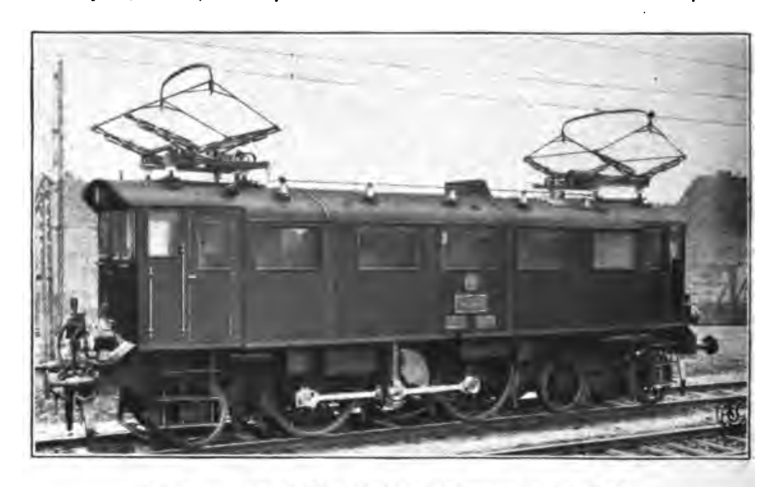


Abb. 59. Elektrische Vollbahnlokomotive, A. E. G.



Abb. 54. Einbau des Motors an einem Fernbahnwagen der A. E. G.

zur Erregung der Pole notwendige Magnetismus erzeugt? Bei den ersten Maschinen bediente man sich der Stahlmagnete, die man in größerer Zahl aufeinanderlegte, um die Wirkung zu erhöhen. Diese Magnete sind kostspielig, sie verlieren alsbald einen Teil ihrer Kraft und bleiben überhaupt in ihrer Stärke weit hinter dem Elektromagnet gleicher Abmessung zurück. Der Gedanke lag nahe, den schon längst bekannten Elektromagneten zur Erregung des Feldes heranzuziehen, aber erst die genialen Arbeiten von W. v. Siemens verwirklichten die Idee im „elektrodynamischen Prinzip", das dieser große Forscher und Techniker im Jahre 1867 einführte. Ebenso wichtig wie diese Idee für die Praxis wurde, ebenso einfach und selbstverständlich erscheint sie uns heute. Denken wir uns eine Maschine, etwa der geschlossenen Bauart in Abb. 25, mit Drahtspulen versehen, die wir auf die Magnetschenkel N—S aufschieben und denken wir uns Strom hindurch geleitet, den wir etwa einer galvanischen Batterie entnehmen, so wissen wir nach früheren Ausführungen, daß auch dann noch Magnetismus vorhanden ist, wenn der Strom unterbrochen ist: remanenter Magnetismus. Siemens verfuhr zunächst so, daß er den infolge des remanenten Magnetismus in der Maschine sich entwickelnden elektrischen Strom, bevor er in den äußeren Stromkreis gelangte, zuvor durch die Windungen der Elektromagneten schickte. Dies zeigt schematisch Abb. 26 in der in der Elektrotechnik üblichen Darstellungsweise. Von der Bürste B_1 gelangt der Strom durch die Magnetwicklung M zum Netz und dann durch B_2 zum Anker A zurück. Der innere Vorgang beim Anlassen der Maschine ist leicht zu überblicken: der anfänglich erzeugte schwache Strom verstärkt das Magnetfeld, dadurch nimmt der Ankerstrom zu, der nunmehr wiederum die Feldstärke erhöht, und so geht das Spiel fort bis die Sättigung erreicht ist. Man erkennt aber auch zugleich einen Nachteil des Systems: die Maschine arbeitet mit veränderlicher Klemmen-

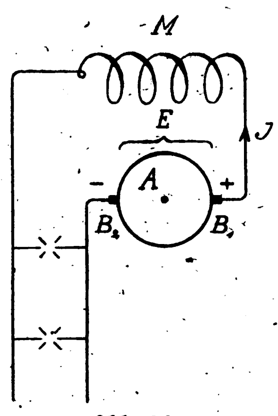


Abb. 26. Schaltung der Hauptschlußmaschine.

spannung, denn in dem Maße, wie der Magnetismus ansteigt oder überhaupt sich ändert, ändert sich auch die elektromotorische Kraft E, diese ist daher abhängig von der Stärke des Stromes im äußeren Stromkreis, im Netz. Ein anschauliches Bild der gegenseitigen Abhängigkeit gibt uns die graphische Darstellung in Abb. 27, die uns die sogenannte äußere Charakteristik vor Augen führt. Wir tragen in einem passenden Maßstab die Stromstärke I auf einer Geraden, der Abszisse, auf (etwa 1 mm = 1 Ampere) und senkrecht dazu, auf der Ordinate, die Werte der Klemmenspannung E. Beide Größen ermitteln wir während des Betriebes. Wir erhalten so ein Koordinatensystem, in das wir die Spannungskurve in der Weise einzeichnen, daß wir die zugehörigen Punkte miteinander verbinden. Diese Punkte ergeben sich in folgender Weise: Wir messen bei 10, 20, 30 usf. Ampere die entsprechende Spannung an den Klemmen der Maschine und tragen die Werte in Volt, ebenfalls in einem passenden Maßstab, etwa 1 mm = 1 Volt, senkrecht in den Punkten der zugehörigen Stromstärke auf. Derartige Darstellungen sind in Wissenschaft und Technik sehr beliebt, da sie in übersichtlicher Weise einen Einblick in die Verhältnisse gestatten. So erkennen wir sogleich, daß die wichtigste Forderung für die Stromverteilung, die der Verbraucher an den Stromerzeuger stellt, nämlich konstante Klemmenspannung, nur vorhanden ist, wenn die Charakteristik in der durch die gestrichelte Linie dargestellten Geraden gegeben ist. Nur so ist die Forderung erfüllt, daß die Netzspannung konstant und völlig unabhängig ist von der Stärke

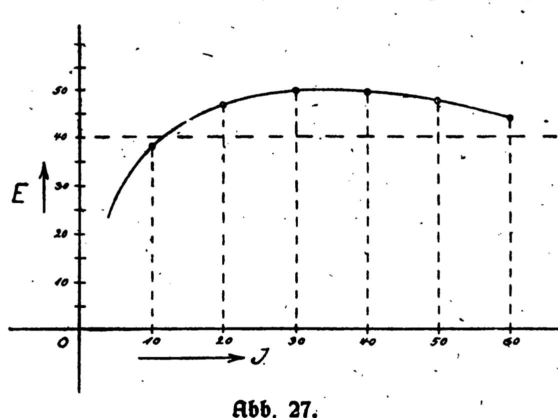


Abb. 27.
Äußere Charakteristik der Hauptschlußmaschine.

der Belastung im äußeren Stromkreis. Unsere Betrachtung lehrt daher: die Maschine, bei der die Ankerwicklung mit der Magnetwicklung hintereinander geschaltet ist, mit dieser in *Reihe* oder in *Serie* liegt, die *Hauptschlußmaschine*, ist für die Netzversorgung unbrauchbar.

Wir kennen aber noch eine andere Schaltungsart, die Parallel- oder Nebenschlußschaltung. Bei dieser (Abb. 28) ist die Magnetwicklung an den Bürsten abgezweigt und bildet einen Stromkreis für sich. Der Zweigstrom i soll einen nur unbeträchtlichen Teil des im Anker erzeugten Stromes beanspruchen, es muß daher die Nebenschlußwicklung einen der Klemmenspannung E entsprechenden großen Widerstand besitzen, d. h. aus dünnem Draht und vielen Windungen bestehen. Dadurch ergibt sich von selbst die erforderliche Magnetisierungsstärke, da diese, wie wir gesehen haben, von dem Produkt aus Stromstärke und Windungszahl abhängt.

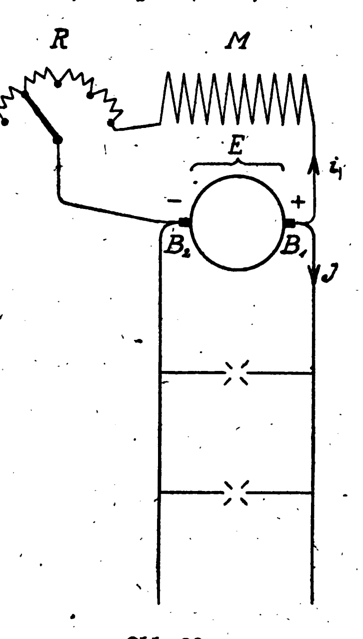


Abb. 28.
Nebenschlußschaltung.

Die *Nebenschlußmaschine* erregt sich, wie man sieht, sogleich, ja, wir haben hier das Umgekehrte des vorhin besprochenen Falles: beim offenen äußeren Stromkreis, wenn also $I = 0$, erreicht i seinen größten Wert, die Maschine ist maximal erregt, so daß auch das Maximum der Klemmspannung vorhanden ist. Wird der äußere Stromkreis geschlossen, so muß nunmehr der eigentliche Betriebsstrom den Widerstand in den Ankerwindungen überwinden und die elektromotorische Kraft — die Spannung bei offenem Stromkreis — erfährt einen *Spannungsabfall* e an den Bürsten, so daß hier die Klemmenspannung: Elektromotorische Kraft — e herrscht. e bestimmt sich einfach nach dem Ohmschen Gesetz: $e = I \cdot W$, wenn W den Widerstand des Ankers

bedeutet. Da I eine von der Belastung im äußeren Stromkreis abhängige Größe bedeutet, so ist auch e davon abhängig, d. h. auch die Nebenschlußmaschine arbeitet mit veränderlicher Klemmenspannung, aber umgekehrt wie die Hauptschlußmaschine, die Klemmenspannung sinkt mit wachsender Belastung im Netz. Unsere vorhin aufgestellte Gleichung $e = I \times W$ zeigt uns aber noch mehr, nämlich, daß man den Spannungsabfall e vermindern kann, wenn man den Widerstand des Ankers so klein wie möglich macht. Dies geschieht durch Wahl entsprechend dicker Drähte oder auch Kupferbügel für die Ankerwicklung, deren Querschnitt so groß bemessen wird, wie es einerseits die Leistung der Maschine verlangt, andererseits durch den verfügbaren Wickelraum bedingt wird.

Den Spannungsverlauf der Nebenschlußmaschine bringt man in ähnlicher Weise zur Anschauung, wie bei der Hauptschlußmaschine, die Kurve in Abb. 27 würde nach rechts zu abfallen. Im allgemeinen sind die Spannungsunterschiede nicht so erheblich wie bei der zuerst beschriebenen Maschine. Überdies kann man durch Verwendung des **Nebenschlußregulators** R, Abb. 28, die Spannung bei der Nebenschlußmaschine leicht konstant halten. Dieser Regulator — ein regulierbarer Widerstand nach Art der auf S. 52 beschriebenen, wird in den Nebenschlußkreis eingeschaltet und vom Maschinenwärter bedient. Ein Voltmeter gibt die Netzspannung an, der Wärter schaltet bei sinkender Spannung Widerstand aus, im umgekehrten Falle zu. Es sei noch erwähnt, daß dies auch automatisch geschehen kann.

Die beiden Maschinentypen verhalten sich, wie wir gesehen haben, hinsichtlich der Spannung entgegengesetzt. Durch Vereinigung beider Wicklungen, indem man die Magnetschenkel z. T. mit Hauptschluß, z. T. mit Nebenschlußwicklung versieht, gelingt es, die entgegengesetzt wirkenden Nachteile gerade aufzuheben, so daß die Charakteristik innerhalb der Belastungsgrenzen der Maschine als gerade Linie, wie in Abb. 27 dargestellt, parallel zur Abszissenachse verläuft. Diese Maschinen besitzen **Verbund-** oder **Campoundwicklung**. Meist findet man aber die Nebenschlußmaschine vertreten, da diese sich leicht einregulieren läßt.

Um die Leistung der Dynamomaschine zu erhöhen, könnte man die Dimensionen vergrößern. In der Entwicklungszeit der Dynamomaschine hat man dies auch getan. Es zeigt sich

aber, daß man auf diese Weise zu gewaltigen Eisen- und Kupfermassen gelangt und daß auch die Verluste sich entsprechend vergrößern. Ein klassisches Beispiel für diese unzweckmäßige Bauart bietet die alte Edisonmaschine mit ihren riesigen Magneten.

Mit dem eigentlichen Einsetzen der Elektrotechnik fand sich auch bald der Weg, der besser zum Ziele führte, es entstanden die vielpoligen Maschinen. Ausgehend von dem ringförmigen Bau des Gehäuses, der heute als Norm gilt, denken wir uns in Abb. 25 senkrecht zu dem vorhandenen Polpaar noch ein zweites im Gehäuse untergebracht und derartig erregt, daß die Pole hinsichtlich ihres Vorzeichens miteinander abwechseln: Nord—Süd—Nord—Süd. Mit zunehmender Vergrößerung von Gehäusering und Anker vermehrt man auch die Polpaare soweit, wie dies die Raumverhältnisse gestatten. Abbildung 29 veranschaulicht schematisch den Bau einer vielpoligen Innenpolmaschine, je zwei benachbarte Spulen bilden mit dem darunter befindlichen Ankerstück ein geschlossenes Magnetsystem, die eingezeichneten Linien deuten den Induktionsfluß an. Wie die Zeichnung weiter zeigt, ist die Nuten-Trommelwicklung auch hier beibehalten, der im übrigen ringförmige Bau des Ankers ergibt sich aus konstruktiven Rücksichten, da der Durchmesser derselben eine Größe von 5 m und darüber erreicht. Die in der Zeichnung nur für einen Teil des Ringes ausgeführte Darstellung von Anker (ohne Wicklung) und Magneten haben wir uns natürlich rings herum zu denken. Bei diesen großen Maschinen wird die Achse des Ankers mit der der Antriebsmaschine direkt gekuppelt, so daß ein besonderes Schwungrad für diese in Wegfall kommt.

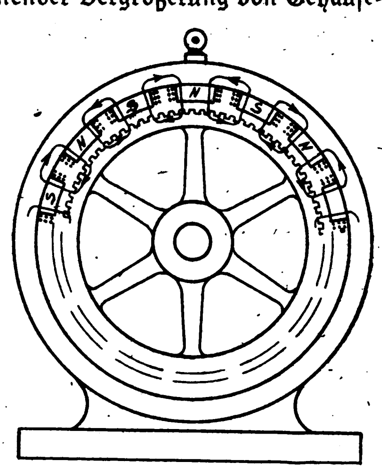


Abb. 29.
Vielpolige Maschine.

Ein delikater Teil einer jeden Gleichstrommaschine ist der Kommutator. An den zahlreichen Segmenten bilden sich beim

Verlassen der Kommutatorbürste kleine Fünkchen, die den Kommutator unter Umständen stark angreifen, man sagt, die Maschine „feuert". Das Feuern wird bei kleinen Maschinen in zulässigen Grenzen gehalten durch den Einbau von Kohlebürsten an Stelle der früher üblichen Bürsten aus Metallgewebe. Bei größeren Maschinen, zumal bei solchen mit größeren Belastungsschwankungen genügt aber dieses Mittel noch nicht. Betrachten wir zunächst einmal die Ursache der Funkenbildung. Sie beruht darauf, daß die Bürste zur Erhaltung des ununterbrochenen Stromflusses gleichzeitig über mehrere Segmente greifen muß, wie dies Abb. 30 veranschaulicht. Daraus folgt, daß jeweils eine Spule in sich kurz geschlossen wird (Spule S), so daß der Strom in dem Moment plötzlich auf 0 sinkt. Einen Augenblick später verläßt die Bürste die kurz geschlossene Spule, so daß der Ankerstrom wieder in seiner vollen Stärke, die er in außerordentlich kurzer Zeit erhält, durch die kurz vorher stromlose Spule fließt. Es entsteht so in dieser durch Selbstinduktion (s. S. 65) eine elektromotorische Kraft von erheblicher Stärke, und der dadurch hervorgerufene Extrastrom sucht einen Ausgleich über die Unterbrecherstelle hinweg, es bilden sich Funken. Man kann sich von diesem Übel einigermaßen befreien, indem man die Bürsten etwas in der Drehrichtung des Ankers verschiebt; dadurch gelangt die kurzgeschlossene Wicklung in den Wirkungsbereich des entgegengesetzten Magneten, der auf die Bildung des Extrastromes kompensierend einwirkt. Dieses Mittel ist indessen unvollkommen und fordert die ständige Überwachung des Kollektors, da die Stärke der Funkenbildung von der jeweiligen Stromstärke im Anker abhängt, infolgedessen auch die Verschiebung der Bürsten. Heute hilft man sich so, daß man zwischen die Feldpole noch Hilfspole einschaltet, die vom Hauptstrom durchflossen werden. Diese Hilfspole, auch Wendepole genannt, stehen der kurz geschlossenen Spule gegenüber und wirken in ähnlicher Weise kompensierend, wie das Feld der nächstfolgenden Spule bei der einfachen Bürstenverschiebung. Da die Wendepole aber vom Ankerstrom selbst erregt werden, so verstärkt sich ihre Wirkung in gleicher Weise, wie die schädigende Wirkung des Extrastromes zunimmt, sie wirken also automatisch.

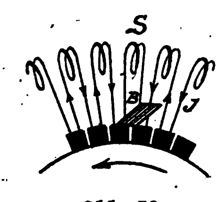


Abb. 30.
Erklärung der Funkenbildung.

Das Streben nach Vollkommenheit zeitigte noch weitere wichtige Ergebnisse bezüglich der Wicklung. Um deren Bedeutung zu verstehen, ist es nötig, auf eine Erscheinung hinzuweisen, die man Ankerrückwirkung nennt. Diese beruht darauf, daß der Ankerstrom, der ja den eisernen Kern umfließt, auf diesen magnetisierend einwirkt. Bei einer zweipoligen Maschine haben wir z. B. infolge dieser Wirkung zwei halbkreisförmige Magnete, die mit den gleichen Polen zusammenstoßen (n n — s s in Abb. 20). Dieses so erzeugte Ankerfeld wirkt zurück auf das Feld der Erregermagnete und bewirkt zunächst eine Verschiebung der neutralen Zone im Drehsinn des Ankers, so daß auch aus diesem Grunde die Bürsten entsprechend zu verschieben sind. Diese Ankerrückwirkung kann aber u. Umst. eine starke Verzerrung des Magnetfeldes hervorrufen, wodurch bei starker Belastung

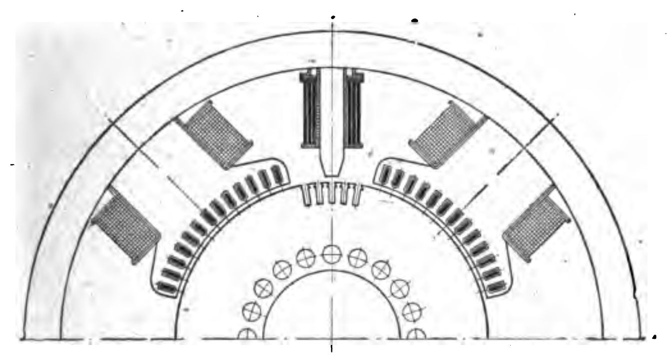


Abb. 31 a.
Schema der Kompensationswicklung und Wendepole.

und bei Belastungsstößen (Bahndynamos u. dgl.) zwischen den Lamellen des Kommutators zu hohe Spannungen auftreten (hohe Segmentspannung). Auf diese Weise entsteht ein Funkenumlauf am Umfang des Kommutators, eine Erscheinung, die in der Technik als „Rundfeuer" wohlbekannt ist. Um dies zu verhindern, versieht man das Magnetgehäuse mit einer Kompensationswicklung, die in die Nuten der verbreiterten Magnetköpfe eingelegt wird, und die, wie die Wendepolwicklung, vom Ankerstrom durchflossen wird. So entstehen Gegenfelder, die den Magnetismus im Anker aufheben und ebenso

automatisch regelnd wirken, wie die Wendepole, da derselbe Strom, der die Störung hervorruft, diese auch wieder vernichtet.

Abb. 31 a zeigt uns im Schema die Einrichtung der Wendepole und der Kompensationswicklung, b gibt die zugehörige

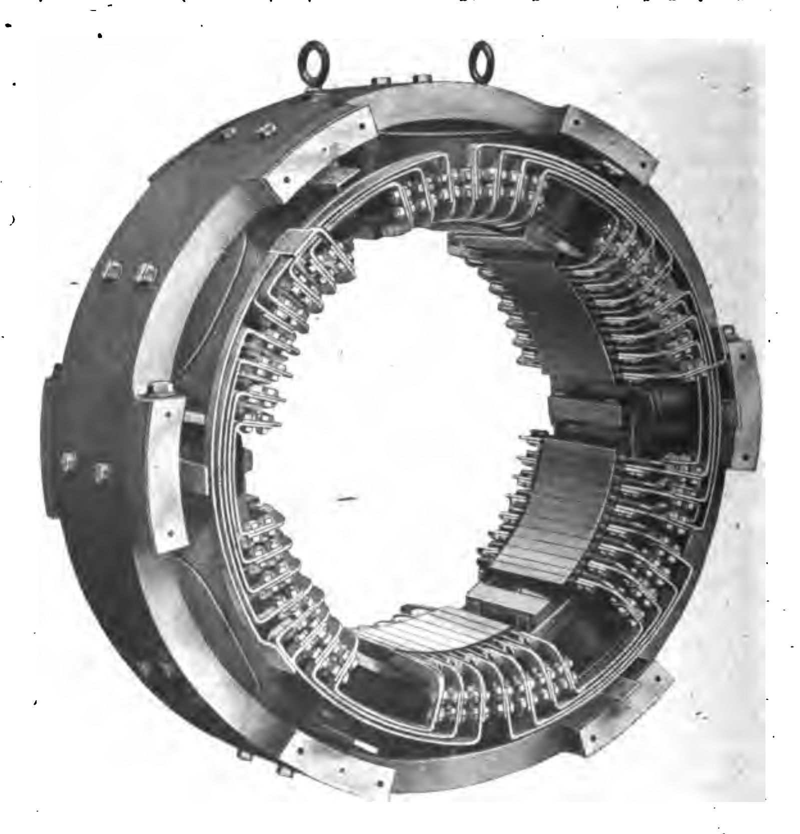


Abb. 31 b.
Gehäuse einer Gleichstrommaschine mit Kompensationswicklung und Wendepolen.

Ansicht. Es ist eine Gleichstrommaschine der Siemens-Schuckertwerke für eine Leistung von 1300 KW. —

Was die Erzeugung von Wechselstrom anlangt, so geht auch

hier die Konstruktion der Maschinen zurück auf jenes wichtige Induktionsgesetz, das für die Stromerzeugung das eigentliche Fundament bildet. Indessen besteht im Aufbau der Maschine ein grundsätzlicher Unterschied der Gleichstromdynamo gegenüber, denn um Wechselstrom zu erzeugen, benötigen wir ein konstantes Magnetfeld, genau so wie bei dieser, und dieses konstante Feld, konstant insofern, als kein Polwechsel stattfinden darf, vermag naturgemäß der Wechselstrom nicht zu liefern: die Maschine kann sich nicht selbst erregen, es muß vielmehr Fremderregung stattfinden. Dazu ist es erforderlich, eine besondere Gleichstromquelle zur Felderregung heranzuziehen und dies geschieht meist durch Einbau einer kleinen Gleichstromdynamo, die auf der Achse des Wechselstromgenerators sitzt.

Was zunächst den grundlegenden Aufbau des Wechselstromgenerators anbelangt, so gibt uns Abb. 32 darüber Aufschluß. In dem Feld N—S des Magnetgehäuses M rotiere der Anker A, den wir uns wie einen Elektromagneten denken wollen, bestehend aus zwei Spulen auf gestrecktem Eisenkern. Die Spulen sind hintereinander geschaltet, die freien Enden der Wicklung sind behufs Stromabnahme zu sogenannten Schleifringen s_1 und s_2 geführt. Es sind dies zwei nebeneinander liegende Metallringe, die unter sich und gegen die Achse isoliert sind; auf diesen Ringen liegen unter leichtem Druck Kohlebürsten auf, mit denen die äußere Leitung verbunden ist und die den Strom während der Rotation abnehmen. Die Ringe sind in Abb. 32 der Anschaulichkeit halber ineinander gezeichnet.

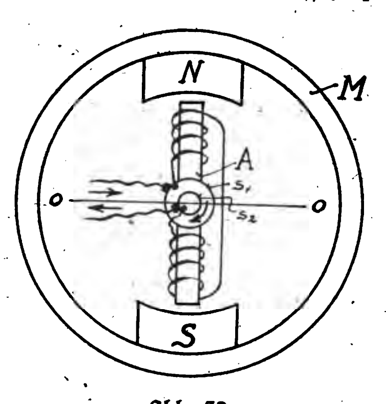


Abb. 32.
Erzeugung von Wechselstrom.

Bei der in der Abbildung dargestellten Lage findet offenbar das Maximum der Induktion statt, die Stromstärke erreicht also in diesem Augenblick ihren höchsten Wert. In dem Maße, wie die Rotation des Ankers fortschreitet, nimmt die Stromstärke ab, sie wird gleich 0, wenn die Spulenachse mit der neutralen Zone

0—0 zusammenfällt. Bei weiter fortschreitender Rotation gelangen die Spulenenden des Ankers in das entgegengesetzte Magnetfeld, der Strom muß also seine Richtung umkehren, nimmt dann wieder an Stärke zu, erlangt wieder den Wert 0, wechselt seine Richtung, strebt dann wieder dem Maximum zu und hat, wenn die Spule bei der Ausgangsstelle angelangt ist, einen Zyklus, eine Periode vollendet.

Wir hatten früher schon die Natur des Wechselstromes besprochen (S. 12) und uns die Verhältnisse an einem graphischen Bilde (Abb. 5) klargemacht. Auf den Zusammenhang zwischen der Stromerzeugung und den in der Kurve dargestellten Werten konnten wir dort noch nicht näher eingehen. Nunmehr, die Wirkungsweise der Maschine vor Augen, werden wir ohne Schwierigkeiten den Verlauf des Kurvenzugs verstehen.

Die Wechselstromgeneratoren sind Stromerzeuger von der allergrößten Bedeutung, indem sie allein es ermöglichen, die Elektrizität auf große Entfernungen hin zu übertragen. Die Gründe hierfür werden wir später (Kap. VI) kennen lernen. Man trifft diese Maschinen immer bei den Überlandzentralen an, die entlegene Wasserkräfte ausnützen oder deren Betrieb durch die Nähe großer Kohlenlager an eine bestimmte Örtlichkeit gebunden ist. Von hier aus verbreitet sich das Netz auf große Entfernungen in das Gelände hinein. Natürlich müssen die Wechselstrommaschinen für große Leistungen gebaut sein und erhalten deshalb gewaltige Abmessungen, sie sind immer vielpolig ausgeführt.

Die Natur des Wechselstromes bringt für die Stromabnahme einen bemerkenswerten Vorteil mit sich. Dieser besteht darin, daß man den Strom nicht dem rotierenden Teil der Maschine, dem Rotor oder Läufer entnimmt, sondern dem Stator oder Ständer. Dies erläutert Abb. 33. Die einfache Anordnung in Abb. 32 mit zwei Magnetpolen im Anker denken wir uns in den feststehenden Ring R mit einer großen Zahl nach innengerichteter Pole übergeführt. Das Magnetfeld wird hier von dem Rotor, dem sogenannten Polrad P geliefert.

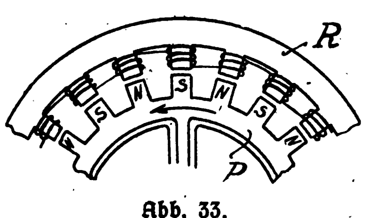


Abb. 33.
Schema des Wechselstromgenerators.

Dieses Polrad führt abwechselnd die Elektromagnete N—S—N — S usf. (die Wicklung ist in der Zeichnung fortgelassen), deren Zahl der Zahl der Polansätze im Stator entspricht. Der Erregerstrom hat verhältnismäßig geringe Stärke bei niedriger Spannung, man kann ihn daher leicht mittelst Schleifringen und Bürsten dem rotierenden Teil der Maschine zuführen, während man den erzeugten Starkstrom, der unter Umständen bis 1000 Ampere und mehr beträgt, dem feststehenden Teil, der hier also den Anker bildet, ohne weiteres entnimmt. Bedenkt man, daß zur Entnahme solch gewaltiger Ströme aus dem Rotor Schleifringe und Bürsten von außerordentlich großen Dimensionen erforderlich wären, so erkennt man sogleich den großen Vorteil dieses Umkehrprinzips.

Eine sehr wichtige Rolle spielt der Drehstrom, auch Dreiphasenstrom genannt. Es ist dies eine Stromart, die sich aus drei Wechselströmen zusammensetzt, derartig, daß diese in ihrem zeitlichen Verlauf gegeneinander verschoben sind. Zweck und Bedeutung des Drehstroms wird uns im nächsten Kapitel näher interessieren, hier wollen wir zunächst die Art der Erzeugung besprechen. Dabei begegnen wir keinerlei Schwierigkeiten, denn, wie Abb. 34 erläutern soll, ist es nur nötig, die Statorwicklung dreiteilig auszuführen: Wicklung I, II und III. Die Magnetspulen N. S, N... erzeugen nun in den Wicklungen nacheinander Wechselströme, die um $^1/_3$ Periode gegeneinander verschoben sind. Spule I befindet sich im Maximum des Feldes, der rechte Teil der Wicklung im Nordfeld, der linke im Südfeld, die Ströme addieren sich daher. Spule II wird im abnehmenden Sinne vom Süd- und Nordpol induziert, bei Spule III wirken Süd- und Nordpol verstärkend, der Strom nähert sich dem entgegengesetzten Maximum wie in Spule I. Der Stromverlauf dieser drei um 120° in der Phase gegeneinander verschobenen Ströme ist bei Besprechung des Drehstroms auf graphischem Wege anschaulich zur Darstellung gebracht (s. Abb. 41 auf S. 54); wir werden also darauf noch zurückkommen.

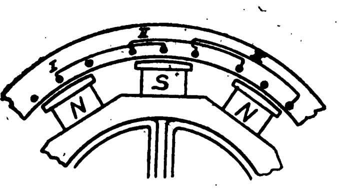


Abb. 34.
Schema des Drehstromgenerators.

In Abb. 35 (auf Tafel II) erblicken wir einen großen Drehstromgenerator der A. E. G. für eine Leistung von 1450 KW.

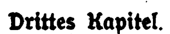


Abb. 37. Bau des Generators für Wasserturbinen.

Man ersieht daraus deutlich die Anordnung der Magnetspulen auf dem Polrad und gewinnt im übrigen einen Einblick in die gewaltigen Abmessungen dieser großen Wechselstrommaschinen, deren Aufbau doch so außerordentlich einfach ist!

Bei den großen Wasserkraftanlagen, z. B. der Urft-Talsperre bei Gemünd i. d. Eifel nutzt man die Kraft des Turbinenrades unmittelbar aus, indem man den Läufer des Generators wagerecht auf der vertikalen Turbinenwelle anbringt und das Gehäuse ebenfalls wagerecht über dem Turbinenschacht montiert. Dies erläutert Abb. 36 (auf Tafel II), die eine Ansicht eines von den S. S. W.[1]) eingerichteten Elektrizitätswerkes wiedergibt. Dort wird die Kraft von 6 Turbinen auf 6 Drehstromgeneratoren übertragen, von denen eine jede 6250 KW abzugeben imstande ist. Den Bau eines derartigen Generators illustriert Abb. 37. Links oben ist die Maschine im Schnitt dargestellt, rechts davon in der Ansicht. Die untere Figur gewährt einen Einblick in den Bau des Polrades, in das die Magnete mittelst schwalbenschwanzförmiger Ansätze eingekeilt sind. Der zur Erregung der Magnete erforderliche Strom wird von einer Gleichstrommaschine geliefert, die am oberen Ende der Turbinenwelle sichtbar ist und mit dieser in direkter Kuppelung steht. Das Polrad ist aus Stahlguß hergestellt und besonders kräftig ausgeführt, da bei den Wasserturbinen verhältnismäßig hohe Drehzahlen erreicht werden und infolgedessen starke Fliehkräfte auftreten. So erreicht die Fliehkraft bei einem Pol von 1700 kg Gewicht bei 900 Umdrehungen pro Minute die stattliche Höhe von 1300000 kg!

Im Ankergehäuse erkennt man unmittelbar vor dem Pol das „aktive" Eisengerüst des Stators, versehen mit radial verlaufenden Luftkanälen, die zur Kühlung dienen. Quer dazu verlaufen die Nuten zur Aufnahme der Ständerwicklung, bestehend aus Kupferstäben, die, gut isoliert, in die Nuten eingelassen sind; diese Art der Wicklung nennt man Stabwicklung.

Der Antrieb der großen Generatoren für Leistungen von mehreren 1000 PS erfolgt, wo keine Wasserkraft zur Verfügung steht, in den weitaus meisten Fällen mittelst der Dampfmaschine, obwohl die Gas- und Ölmotoren in letzter Zeit wesentlich verbessert worden sind. Bei dem ungeheuren Verbrauch von Kohlen und wegen der Notwendigkeit, den Betrieb so sparsam wie möglich

[1]) Siemens-Schuckert-Werke; im folgenden wird diese Bezeichnung beibehalten.

zu gestalten, wurden die Techniker vor die Aufgabe gestellt, die Ausnutzung des Dampfes in noch vollkommenerer Weise anzustreben, als dies bisher möglich war. Eine schwierige Aufgabe freilich war es. War doch die Dampfmaschine bereits auf einer hohen Stufe der Vollkommenheit angelangt, und wenn trotzdem, ausgehend vom Heizwert der Kohle, bis zu jener Stelle, wo die Kraft abgegeben werden soll, die Verluste erheblich sind, so liegt dies in der Natur der Kolbendampfmaschine begründet und man kannte deren Ursachen zu gut, als daß man hätte hoffen können, hier noch wesentlich zu verbessern. Ein anderer Weg mußte eingeschlagen werden, und in der Dampfturbine, die jedermann dem Namen nach kennt, fand sich das Mittel, die Ökonomie des Betriebes noch wesentlich zu steigern.

Vergleicht man zwei Maschinenanlagen gleicher Leistung, die Kolbendampfmaschine mit der Dampfturbine, so fällt zunächst der Unterschied im Aufbau auf, sowohl was Größe als auch was die Form anlangt. Mit Spannung und Interesse verfolgt das Auge das blinkende Spiel der hin- und herschwingenden Massen bei der Kolbendampfmaschine, und die gewaltige Kraft, mit der die stählernen Arme immer wieder zu neuer Arbeit ausholen, wird uns unmittelbar vor Augen geführt. Nicht so bei der Dampfturbine. Hier verrichtet der Dampf im Innern geschlossener Gehäuse seine Arbeit, und was dort vor sich geht, bleibt dem Auge verborgen. Die imponierende Ruhe, die den Gang der Kolbenmaschine trotz der Menge der bewegten hin- und hergehenden Massen auszeichnet, ist bei der Turbine verschwunden und an ihre Stelle tritt ein summendes, zischendes Geräusch, hervorgerufen durch das Einströmen hochgespannter Dämpfe, die sich über die Leitschaufeln hinweg auf das Turbinenrad stürzen, von Stufe zu Stufe hinunter gleitend, um dann, der tosenden Hölle entronnen und völlig erschöpft, die ersehnte Freiheit zu erlangen. Und das, worauf das Auge mit Bewunderung ruht, das wechselvolle und wunderbar geordnete Spiel komplizierter Getriebe, hat der Kolbendampfmaschine für gewisse Anlagen den Todesstoß versetzt. Diese schwingenden Teile mit ihren zahllosen Gelenken, diese Massen, die bald nach vorn, bald nach hinten getrieben werden, verzehren einen beträchtlichen Teil der zugeführten Energie, während bei der Dampfturbine wie beim Wasserrad das Wasser der Dampf seine Kraft unmittelbar an die anzutreibende Welle abgibt. Daraus ergibt sich der weitere Vorteil hoher Dreh-

zahlen, so daß der Maschinenkörper kleine Abmessungen erhalten kann. Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß, wie die Mechanik lehrt, eine Arbeitsleistung gleich ist dem Produkt aus Kraft und der Wegstrecke, auf der sie wirkt, bezogen auf die Zeit. Ist der Weg in einer bestimmten Zeit groß, so kann für die gleiche Arbeit die Kraft klein ausfallen. Bei der Turbine ist der Weg, auf dem die Kraft des Dampfes wirkt, gleich der Strecke, die der Angriffspunkt der Kraft, also ein Punkt am Umfange des Turbinenrades, in der Zeit zurücklegt. Diese Strecke hängt offenbar von der Drehzahl ab, mit deren Zunahme sich die Kraft vermindert: ist die Kraft klein, so kann der ganze Mechanismus klein ausfallen.

Die Umdrehungszahl der Dampfturbine liegt etwa zwischen 1000—3000 pro Minute. Der Rotor des Generators wird direkt mit der Turbinenachse verbunden, er muß also für eine sehr hohe Peripheriegeschwindigkeit konstruiert werden. Wegen der auftretenden Fliehkräfte, über deren Größe wir uns bei Besprechung der Wasserturbinen ein Bild machten, bot die konstruktive Durchbildung in der ersten Zeit nicht unerhebliche Schwierigkeiten, zumal die Abkühlungsflächen wegen des gedrungenen Baues vermindert wurden. Die Aufgabe konnte nur gelöst werden durch Wahl des besten Materials für den Körper wie auch für die Leiter sowie deren Isolation. Ferner mußte die unvermeidliche Erwärmung, in die sich die Verluste umwandeln durch den Einbau einer kräftig wirkenden Luftkühlung abgeführt werden. Die kalte Luft wird seitlich angesaugt, gelangt dann durch den mit Kanälen versehenen Rotor, desgleichen durch den Stator und entweicht oben in den Maschinenraum.

Viertes Kapitel.

Die Elektrizität als Mittel zur Kraftübertragung, Gleichstrommotoren, Maschinen für einphasigen und mehrphasigen Wechselstrom.

Die Dynamomaschine war schon lange erfunden und die Stromerzeugung im Großen hatte technisch keine Schwierigkeiten mehr, aber der erzeugte Strom diente zunächst fast ausschließlich elektrolytischen Zwecken und zum Betrieb des elektrischen Bogenlichts. Freilich kannte man schon seit vielen Jahren den Elektro-

magneten und benutzte ihn ausgiebig in der Schwachstromtechnik, um Mechanismen zu betreiben, die ihre Tätigkeit in weiter Ferne entfalteten. Auch hatte man wohl des öfteren versucht, die anziehende oder abstoßende Kraft des Elektromagneten auf das Gestänge einer Maschine in ähnlicher Weise wirken zu lassen, wie dies die Kraft des Dampfes bei der Dampfmaschine schon seit Jahrzehnten besorgte. Diese Maschinen verschlangen aber den ihnen gelieferten Strom mit einer wahren Gier, ohne entsprechendes dafür zu leisten, sie stellten außerdem hohe Anforderungen an die Mittel zu ihrer Herstellung, so daß man auf diesem Wege nichts erreichte. Aber mit zunehmender Entwicklung der Stromerzeuger wurde die Technik mehr und mehr zur Lösung des Problems der elektrischen Kraftübertragung gedrängt, die sich ja im übrigen mittelst einer einfachen Drahtleitung so leicht ausführen lassen mußte. Unter den bedeutenden Männern der damaligen Zeit — in den 70er Jahren des v. Jahrh. —, die an der Aufgabe rastlos arbeiteten, steht Werner von Siemens obenan. Dem Gelehrten und Techniker schwebte die Idee beständig vor Augen, und sein Forscherdrang, verbunden mit technischem Instinkt, mußte ihn bald auf den richtigen Weg führen. Vor allem lag ihm daran, den elektrischen Strom zum Betriebe von Eisenbahnen zu benutzen, und in der Tat führte er gelegentlich der Berliner Gewerbeausstellung 1879 der Welt den ersten elektrisch betriebenen Straßenbahnzug vor Augen. Von ihm stammt ferner der erste elektrisch betriebene Personenaufzug, ferner Bohrmaschinen u. a. m.

Die ersten Elektromotoren wurden mit Gleichstrom betrieben, denn die Erfindung der Gleichstromdynamomaschine schloß die Erfindung des Gleichstrommotors in sich: dieser ist tatsächlich nichts anderes als eine Dynamomaschine, die man aber nicht mechanisch antreibt, sondern der man Strom zuführt, der den Anker in Rotation versetzt und ihn befähigt, an der Riemenscheibe eine bestimmte Leistung abzugeben. Daß dies tatsächlich der Fall sein muß, lehrt ein kurzes Studium der Abb. 20 auf Seite 27. Fließt der Strom an der linken Seite der Maschine zu, so verteilt er sich in den beiden Ankerhälften, von denen eine jede offenbar einen halbkreisförmigen Magneten darstellt und zwar bei der in der Zeichnung gewählten Stromrichtung mit den Polen s—s links und entsprechend n—n rechts. Da die Erregung der Pole auch bei Rotation des Ankers an derselben Stelle im Raume

bestehen bleibt, so wirken auf den Anker beständig abstoßende und anziehende Kräfte im Sinne der Drehrichtung: der Nordpol N des Feldmagneten stößt die gleichpolige linke Ankerhälfte ab, er zieht hingegen die rechte Hälfte an, und im gleichen Sinne erteilt auch der Südpol S dem Anker ein Drehmoment rechts und links und unter dem Einfluß dieser vier Kräfte, die in jedem Augenblick wirken, dreht sich der Anker, ganz unabhängig davon, in welcher Stellung er vorher stehen geblieben ist.

Es bedarf kaum der Erwähnung, daß der geschilderte Vorgang sich ebenso im Trommelanker wie im Ringanker vollzieht, auch sieht man leicht ein, daß sowohl die Hauptschluß-, wie auch die Nebenschluß- und die Verbundwicklung angewendet werden können, und je nach dem Verwendungszweck des Motors wählt man die eine oder die andere Bewicklung der Feldmagnete. Der Hauptschlußmotor zeichnet sich durch sehr hohes Anzugsmoment aus, d. h. er ist imstande, gleich bei Beginn seiner Tätigkeit vorübergehend beträchtlich höhere Leistung zu entfalten, als dies im normalen Betrieb der Fall ist. Man findet diese Motoren deshalb in Betrieben, wo die erwähnte Eigenschaft besonders erwünscht ist, z. B. bei elektrischen Straßenbahnen, Automobilen u. dgl. Die hohe Anzugskraft des Hauptschlußmotors erklärt sich dadurch, daß dem Anker zur Überwindung des Trägheitswiderstandes, den die anzutreibenden Massen bis zu ihrer vollen Bewegung benötigen, ein sehr starker Strom zugeführt werden muß, und da die Feldwicklung, mit der des Ankers in Reihe geschaltet ist, so ist auch eine starke Erregung des Feldes vorhanden, also auch starke magnetische Kraftwirkung. Nimmt die Belastung ab, so nimmt der Anker eine höhere Umlaufzahl an und der Betriebsstrom vermindert sich. Daraus folgt, daß die Tourenzahl des Motors nicht konstant ist, sie ändert sich vielmehr mit der Belastung, eine Erscheinung, die in Betrieben der bezeichneten Art wohl erwünscht ist, dagegen recht störend wirken würde, wenn auf konstante Umdrehungszahl bei wechselnder Belastung Wert gelegt wird, wie dies in zahlreichen gewerblichen und industriellen Betrieben der Fall ist. Hier ist der Nebenschlußmotor am Platze. Aus früheren Darlegungen geht hervor, daß der Erregerstrom des Nebenschlußmotors eine ganz bestimmte Stärke besitzt, unabhängig von der Stärke des Ankerstromes, denn die Nebenschlußwicklung liegt direkt parallel zum Leitungsnetz, die Felderregung bleibt also konstant. Je nach der Arbeits-

leistung nimmt nun der Anker des Nebenschlußmotors mehr oder weniger Strom auf, auch strebt der Motor konstante Umdrehungszahl an. Dies folgt aus der Tatsache, daß im Anker eines Motors ebenso wie in dem einer Dynamo eine elektromotorische Kraft erzeugt wird, wenn er sich im Felde dreht, denn auf die Art des Antriebs kommt es nicht an. Diese Kraft nennt man elektromotorische Gegenkraft, sie ist stets der angelegten Spannung entgegengesetzt gerichtet und immer um so viel geringer als diese, wie es der Strombedarf des Ankers fordert. Wird der Motor plötzlich von Vollast auf Leerlauf gestellt, so hat der Anker zunächst nach der Entlastung das Bestreben, „durchzulaufen". Damit wächst aber sofort die elektromotorische Gegenkraft, denn diese hängt, wie wir wissen, von der Geschwindigkeit ab, mit der die induzierten Leiter das Magnetfeld durcheilen. Es wird daher der Ankerstrom sofort geschwächt, und dadurch auch die Tourenzahl auf den normalen Stand zurückgeführt.

Jeder Elektromotor, mit Ausnahme der kleinen Typen, wie man sie bei Ventilatoren u. dgl. verwendet, ist mit einem sogen. Anlasser versehen, der den Zweck hat, einer Überlastung der Maschine durch zu starken Anlaufstrom vorzubeugen und Kurzschluß zu vermeiden. Denken wir uns nämlich den Motor noch in Ruhe, so entwickelt der Anker natürlich noch keine elektromotorische Gegenkraft und da sein Widerstand, und beim Hauptschlußmotor auch der der Magnetwicklung sehr klein ist, so würde im Moment des Einschaltens ohne Vorschaltwiderstand der Anker kurz geschlossen sein, d. h. die zwischen den Bürsten liegenden Ankerwindungen würden direkt an die Netzspannung 440 resp. 220 Volt geschaltet. Bei einem Motor, dessen Ankerwiderstand z. B. 0,5 Ohm beträgt, würde sich nach dem Ohmschen Gesetz der Strom zu $I = \frac{220}{0,5} = 440$ Ampere berechnen; dieser Strom würde hinreichen, den Anker im Augenblick zu verbrennen, wenn nicht rechtzeitig die Sicherungsvorkehrungen (s. S. 85ff) einsetzten.

Wie ist nun ein solcher Anlasser eingerichtet? Es ist im Grunde genommen ein höchst einfacher Apparat, nämlich nichts anderes als ein vorgeschalteter Widerstand, der durch Kurbelbewegung von einem größten Wert allmählich bis auf 0 ausgeschaltet werden kann. Dies veranschaulicht Abb. 38, a für den Hauptschlußmotor, b für die Nebenschlußmaschine. Bei dem Hauptschlußmotor

gelangt der Strom über die Sicherungen S und den Hebelschalter H durch den Widerstand zur Kurbel K. Diese Kurbel gleitet über die Kontaktknöpfe C, zwischen denen sich eine oder mehrere Draht-

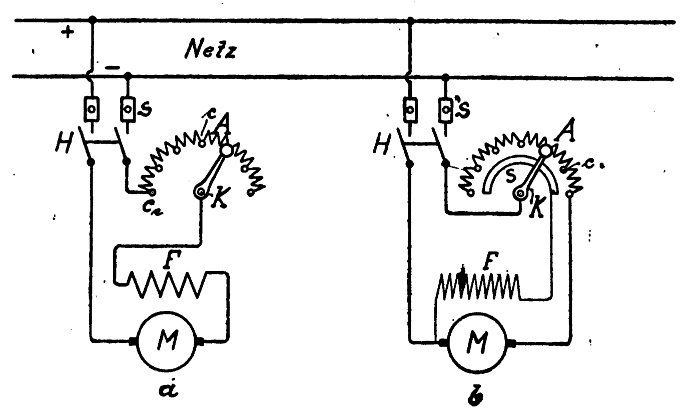


Abb. 38.
Anlaßvorrichtungen.

spiralen aus schlecht leitendem Material (meist Nickelverbindungen), sogenannte Widerstandsdrähte befinden, bis zum Endknopf Ce, bis also der gesamte Widerstand ausgeschaltet ist.

Ähnlich geht die Schaltung beim Nebenschlußmotor vor sich, nur ist hier noch dafür gesorgt, daß gleich bei Beginn des Einschaltens die Magnetwicklung voll erregt, d. h. direkt an das Netz gelegt wird und dauernd bei jeder Kurbelstellung damit verbunden bleibt. Dies geschieht unter Vermittlung des Gleitsektors s, auf dem die Kurbel mit einer zweiten Feder schleift, so daß, wie man erkennt, die Feldwicklung konstant erregt wird, unabhängig von der Stromzuführung im Anker.

Kommt nach dem Einschalten der Motor allmählich in Gang, so wächst damit die elektromotorische Gegenkraft im Anker, die wie ein Widerstand wirkt, so daß der Anlasser langsam bis zum Kurzschluß ausgeschaltet wird. Im allgemeinen geschieht dies bei ortsfesten Motoren immer, der Anlaßwiderstand wird also nur vorübergehend belastet und dementsprechend mit Rücksicht auf die geringeren Kosten schwach ausgeführt. In diesem Falle darf er aber nicht zur Regulierung benutzt werden, da er dann infolge der übermäßigen Stromwärme Schaden leiden und ver-

derben würde. Zum **Regulieren** der Arbeitsleistung, beispielsweise bei elektrischen Bahnen, werden eigens hierzu gebaute Regulatoren benutzt, deren Widerstandsmaterial so beschaffen und dimensioniert ist, daß der starke Betriebsstrom keine unzulässige Erwärmung hervorruft. Abb. 39 veranschaulicht einen Anlasser der Siemens-Schuckert-Werke mit abgenommener Schutzkappe und Kurbel; man erkennt in dem unteren Teil die beiden Schleifkontakte, die Kontaktknöpfe für die Widerstände des Ankerstromkreises und das Gleitsegment für die Feldwicklung. In dem oberen Teil befinden sich die Widerstände, bestehend aus Drähten, einer Nickellegierung, die auf Porzellanrollen aufgewickelt sind. Trotz der kurzen Belastungsdauer beim Einschalten erwärmt sich der Widerstandsdraht verhältnismäßig stark. Bei Motoren für kleine Leistung genügt aber meist Luftkühlung, größere Anlagen verlangen indessen stärkere Ausführung, oder besser, man schließt die Widerstandsrollen in Kästen ein, die mit Öl gefüllt sind: Widerstände mit Ölkühlung.



Abb. 39. Anlaßwiderstand.

Die elektrischen Widerstände sind wichtige Apparate, sie werden für alle möglichen Zwecke der Stromregulierung benutzt. Zur feinstufigen Regulierung verwendet man in Technik wie auch im Laboratorium mit Vorteil die sogenannten **Schiebewiderstände**, deren Einrichtung aus Abb. 40 a und b hervorgeht. Der

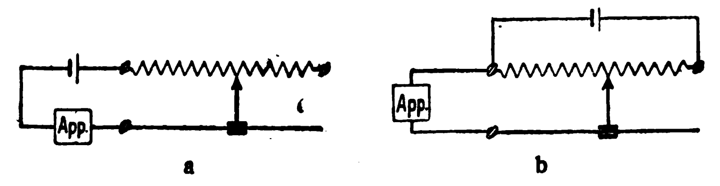


Abb. 40 a und b. Schiebewiderstände.

Widerstandsdraht ist auf einen Träger aus Steingut aufgewunden. Der Anfang der Windungen führt zu der links sichtbaren Klemme (Fig. a). Parallel zur Spule liegt eine Gleitschiene, längs der ein Kontaktbügel verschiebbar ist. Der Strom wird der Schiene,

nachdem er den eingeschalteten Apparat verläßt, zugeführt, gelangt zum Schleifkontakt und von dort durch die Windungen zur Endklemme. Man erkennt leicht, daß je nach der Stellung des Schiebers mehr oder weniger Windungen eingeschaltet sind, und daß eine feine Regulierung von Windung zu Windung möglich ist. Fig. b der Abbildung zeigt schematisch die Schaltung als Spannungsteiler. Zur Spannungsteilung legt man die Gesamtspannung an die Endklemmen, den einzuschaltenden Apparat an eine Endklemme und an die Klemme für den Gleitkontakt. Man kann so alle möglichen Spannungen innerhalb des Spannungsbereichs der angeschlossenen Elektrizitätsquelle dem Apparat zuführen.

Widerstände der beschriebenen Art werden auch bei Nebenschlußmaschinen, sowohl bei Dynamos als auch bei Motoren, zur Regulierung des Stromes in der Feldwicklung benutzt. Ein solcher Nebenschlußregulator gestattet bei Dynamomaschinen, wie in Abb. 28 angedeutet, die Stärke des Magnetfeldes und damit die Klemmenspannung zu regulieren; bei Motoren läßt sich mit ihrer Hilfe die Tourenzahl regeln, indem diese bei schwächerem Feld zunimmt, und umgekehrt mit stärkerer Erregung abnimmt.

Wenden wir uns jetzt zur Besprechung des Wechselstrommotors. Brauchbare Wechselstrommotoren sind das Erzeugnis einer verhältnismäßig neueren Zeit in der Entwicklung der Elektrotechnik, manche Schwierigkeiten mußten aus dem Wege geräumt werden. Es gilt nämlich bei Wechselstrom nicht einfach das Umkehrprinzip von Dynamo und Motor wie bei Gleichstrom. Denken wir uns, um dies zu verstehen, den auf Seite 41 beschriebenen Wechselstromgenerator mit einer Maschine gleichen Baues verbunden, die als Motor anzutreiben sei, so würden die Pole des Ankers abwechselnd nord- resp. südmagnetisch erregt werden, und man übersieht leicht, daß ein Antrieb und eine Mitbewegung des Motorankers nur dann stattfinden kann, wenn dieser sogleich in Gang kommt und die Tourenzahl des Generatorankers annimmt, mit diesem synchron läuft, denn die dem Wechselstrom entsprechenden magnetischen Impulse können für den Motoranker nur dann wirksam sein, wenn er die jeweils entsprechende Stellung im Magnetfeld einnimmt. Ebenso ist klar, daß der Motor nicht mit Last angehen kann, da der Anker dann, an der freien Bewegung gehindert, den in kurzer Folge einsetzenden Stromimpulsen nicht folgen kann;

die wechselnden Pole würden dem konstanten Magnetfeld des Polgehäuses gegenüber dem Anker keinerlei Antrieb erteilen. Ein derartiger Motor müßte daher, bevor er seine Kraftleistung entfalten kann, auf die dem Wechselstromzyklus entsprechende Tourenzahl gebracht, also angeworfen werden. Einmal in Betrieb versetzt, streben Dynamo und Motor den synchronen Gang an, der anhält, solange die Belastung die Zugkräfte der Magnete nicht übersteigt. Ist dies der Fall, so fällt die Maschine „außer Tritt" und bleibt bald darauf stehen. Man nennt derartige Motoren, die nur in besonderen Fällen Anwendung finden, **Synchronmotoren** (s. a. das Kapitel über elektrische Zentralen).

Die allgemeine Einführung der Wechselstromtechnik gelang erst, nachdem brauchbare **Asynchronmotoren** erfunden waren. Es entstand zuerst der Drehstrommotor, nachdem der Mathematiker Ferraris in Verbindung mit dem Ingenieur Tesla das Drehfeld erfunden hatte (1891). Dieser interessante Motor beruht auf der Verwendung der sogen. mehrphasigen Wechselströme, deren Erzeugung wir bereits besprochen haben (S. 43), auf deren physikalische Bedeutung wir aber zum besseren Verständnis der elektrischen und magnetischen Vorgänge näher ein-

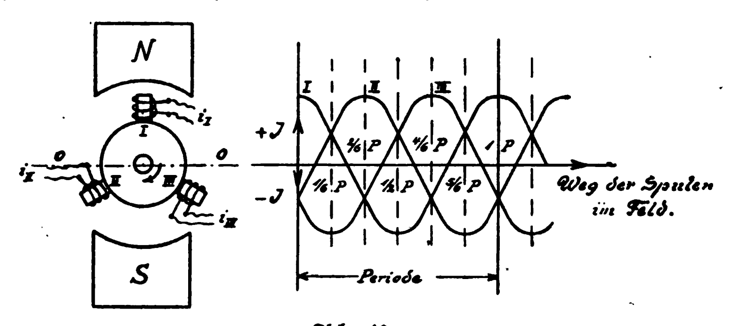


Abb. 41.
Darstellung der Drehstromerzeugung.

gehen müssen. Dazu betrachten wir die schematische Darstellung der Erzeugung des dreiphasigen Stromes in Abb. 41, links und rechts davon das Kurvensystem.

In dem konstanten Magnetfeld N—S befinde sich ein Anker, bestehend aus den drei Elektromagneten I, II, III, die um je

120⁰ gegeneinander versetzt auf gemeinsamer Achse sitzen, mit der sie in der Pfeilrichtung im Felde rotieren können. Zur Erklärung der inneren Vorgänge in den Spulen nehmen wir die graphische Darstellung rechts zu Hilfe. Dort ist der Stromverlauf einer jeden Spule in seiner Abhängigkeit von deren Stellung im Felde als Kurve verzeichnet, die man einfach dadurch erhält, daß man die der jeweiligen Lage der Spule im Felde entsprechenden Stromwerte in einem passenden Maßstab senkrecht zu der Linie aufträgt, die den Weg der Spule bei der Rotation darstellt. Wie uns aus früheren Besprechungen bekannt ist, nennt man eine derartige Darstellung Koordinatensystem mit der wagerechten Linie als Abszisse, der Vertikalen als Ordinate (die Zeichenebene senkrecht stehend gedacht).

Den Weg können wir in Perioden und deren Unterabteilungen: $^1/_6$, $^2/_6$ P usf. darstellen. Spule I befindet sich in dem der Zeichnung entsprechenden Augenblick in unmittelbarer Einwirkung des Nordpols, also im stärksten Erregungsstadium; der Strom hat seinen maximalen Wert. Wir wollen ihn, als vom Nordpol erzeugt, positiv (+) nennen. Zur selben Zeit befinden sich die beiden Spulen II und III im Bereich des Südfeldes, der Strom hat also umgekehrte Richtung (—). Beide Spulen stehen hier nicht im Maximum der Erregung, vielmehr strebt Spule III diesem zu, Spule II dagegen nähert sich bei weiterer Drehung der neutralen Achse. Man übersieht leicht, daß für die folgenden Augenblicke die Stromwerte in analoger Weise gefunden werden, wenn man eine Senkrechte zur Abszissenachse errichtet.

Diese drei in der Phase um 120⁰ verschobenen Wechselströme erzeugen, wie wir jetzt sehen werden, in einem aus drei symetrisch gelagerten Spulen oder Spulenpaaren bestehenden System ein D r e h f e l d. Dies soll Abb. 42 erläutern. Auf einem eisernen Ring befinden sich die drei Spulen I—III, um 120⁰ gegeneinander versetzt. Diese Spulen sind mit den drei geichnamigen Spulen unseres Generators leitend verbunden. Die Ströme rufen in den Spulen entsprechende magnetische Kräfte hervor. Die Kurvenfigur in Abb. 41 lehrt nun folgendes: Bei Beginn der Periode ist Spule I voll erregt, II und III teilweise, aber gleichstark und entgegengesetzt erregt. Ist daher in Spule I ein Nordpol vorhanden, so herrschen in den beiden anderen Spulen gleichstarke Südpole s s, die sich zu dem dem Nordpol N entsprechenden

Südpol S zusammensetzen. Eine Magnetnadel würde sich also in die Richtung N—S einstellen. Nach $^1/_6$ Periode sind I und II gleichstark +, III maximal negativ erregt, dies gibt das Feld n—n = N und S: die Magnetnadel hat sich nach links gedreht. Nach $^2/_6$ Periode sind I und III gleichstark —, II maximal + erregt: die Nadel hat sich um den entsprechenden Betrag weiter gedreht. Nach $^3/_6$ = ½ Periode haben wir I maximal —, II und III gleichstark + erregt: wieder eine Weiterdrehung der Nadel. So kann man das Spiel weiter verfolgen und auch Zwischenpunkte nehmen, immer findet man, daß eine gleichmäßige Drehung des Feldes vorhanden ist.

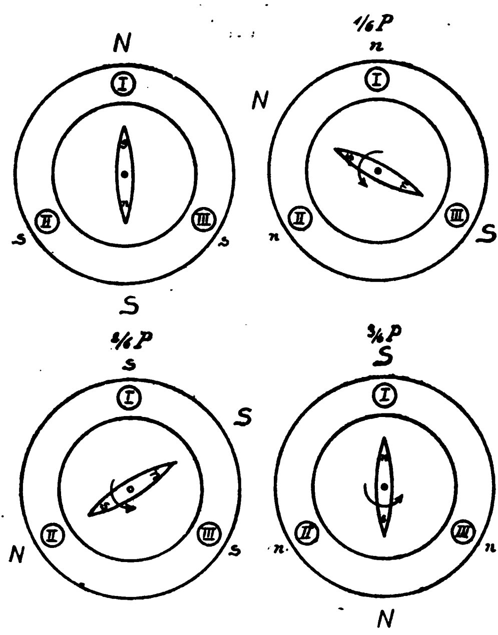


Abb. 42.
Schema des Drehstrommotors.

Wir haben bei unseren Betrachtungen die Art der Stromzuführung nicht näher verfolgt, vielmehr angenommen, daß die zugehörigen Spulen zwischen Generator und Motor (wie wir das Drehfeldsystem nennen wollen) durch je eine gesonderte Hin- und Rückleitung miteinander verbunden seien. Dazu wären 6 Leitungen und am Generator 6 Abnahmestellen mit Schleifringen und Bürsten nötig. Es zeigt sich aber, daß bei passender Schaltung nur drei Leitungen nötig sind, wenn man nämlich die sogenannte verkettete Schaltung anwendet. Das Kurvensystem in Abb. 41 zeigt uns bei näherem Studium, daß in jedem durch die vertikale Linie gekennzeichneten Zeitmoment die Summe

der positiven Stromwerte stets gleich ist der Summe der negativen, d. h. zwei in einer Richtung fließende Ströme sind gleich dem in entgegengesetzter Richtung fließenden, daher ist für jedes System eine besondere Rückleitung überflüssig, wenn die Spulen des Generators und die des Motors passend, und zwar symmetrisch zueinander, verbunden werden. Dazu bieten sich zwei Möglichkeiten, wie dies Abb. 43 veranschaulicht, a) für die Sternschaltung, b) für die Dreieckschaltung.

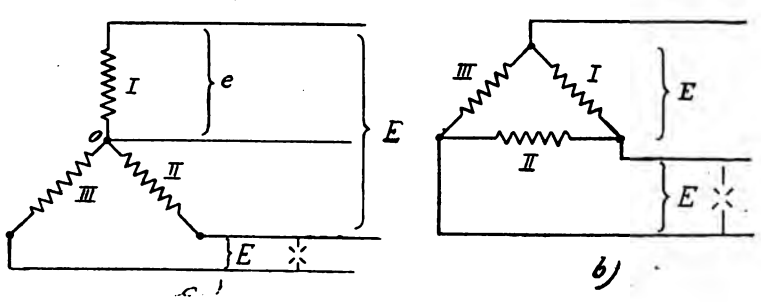


Abb. 43.
Stern- und Dreieckschaltung.

Bei a) sind die Enden der drei Spulen zu einem Punkte 0 geführt und an eine besondere Leitung, die Ausgleichsleitung, angeschlossen; die freien Enden sind mit der Hauptleitung verbunden. Zwischen je zwei Hauptleitern herrscht die Hauptspannung E, zwischen die z. B. Glühlampen eingeschaltet werden. Ein Vorteil dieser Schaltungsart der Dreieckschaltung gegenüber bietet der Ausgleichsleiter, indem dieser Spannungsschwankungen im Netz ausgleicht und vor allem gestattet, eine niedrigere Spannung dem Netz zu entnehmen, ohne Energie verzehrende Widerstände einzuschalten. Es herrscht nämlich zwischen je einem Hauptleiter und der Ausgleichsleitung eine Spannung $e = \frac{E}{1,732}$, die man auch Phasenspannung nennt. Dies ist namentlich bei der Wahl von Motoren wertvoll, da dadurch ein gewisser Spielraum hinsichtlich der Spannung besteht, was in der Praxis angenehm empfunden wird.

Bei der Dreieckschaltung (b) ist je ein Anfang einer Spule mit dem Ende der nächstfolgenden zu einem geschlossenen System

vereinigt, man spricht auch von geschlossener Schaltung, im Gegensatz zu der offenen Sternschaltung.

Der nächste Schritt nach Erfindung des Drehfeldes galt dem Bau eines passenden Motors unter Ausnutzung dieses eigenartigen Phänomens. Prinzipiell war der Motor ja eigentlich schon erfunden: die in das Drehfeld gebrachte Magnetnadel wurde in kräftige Rotation versetzt, es entspricht dies dem Falle eines Synchronmotors. Das Drehfeld läßt sich aber noch viel besser zum motorischen Antrieb verwenden unter Ausnützung der induktiven Wirkung. Hierauf beruht die Wirkungsweise des asynchronen Drehstrommotors. Wenn wir nach Abb. 44 den Leiter l etwa in der Pfeilrichtung mit der Geschwindigkeit v durch das Magnetfeld des Nordpols N bewegen, so entsteht an den Enden des Leiters eine elektromotorische Kraft e, die den Strom i hervorruft. Dieser Strom repräsentiert eine gewisse Energie, er kann Arbeit leisten und nach dem Grundgesetz von der Erhaltung der Energie, welches besagt, daß Arbeit nur gewonnen werden kann durch Aufwand einer ebenbürtigen, wenn auch in anderer Form, ist leicht einzusehen, daß zur Fortbewegung des Leiters l eine ganz bestimmte Arbeit geleistet werden muß. Diese Arbeit dient zur Überwindung des Widerstandes, hervorgerufen durch die abstoßende Kraft zwischen Magnetpol und stromdurchflossenem Leiter (resp. anziehende Kraft, wenn der Leiter sich vom Pol entfernt, s. a. S. 19, Linkehandregel). Würde der Leiter ruhen und der Magnet bewegt werden, so würde natürlich die gleiche Kraftwirkung zwischen beiden Teilen bestehen, der Magnet würde den Leiter mitzunehmen suchen. Abb. 45 erläutert nun die Art, wie man diese Erscheinung praktisch ausnutzt. Wir denken uns ein käfigartiges Gebilde als Anker in das Magnetfeld N→S gebracht. Der Käfig kann sich um eine Achse drehen. Wird jetzt das Magnetfeld um die gleiche Achse gedreht, so entstehen die Induktionsströme i_1, i_2 usf. in den einzelnen Leitern, wie oben beschrieben, und der Anker wird vom Felde mitgenommen. Die

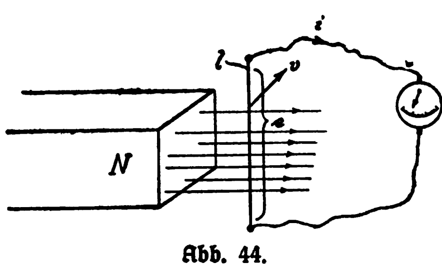


Abb. 44.
Induktion im gestreckten Leiter.

Betrachtungen auf S. 56 lehren uns aber, daß ein derartig künstlich in Umlauf versetztes Magnetfeld gleichbedeutend ist mit einem Drehfeld; bringen wir daher den Käfiganker in dieses hinein, so haben wir einen Drehstrommotor, einen Motor, wie er einfacher kaum gedacht werden kann.

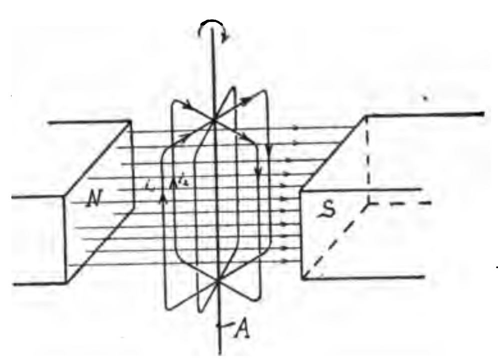


Abb. 45.
Schema des Käfigankers.

Der Rotor, bestehend aus vielen in sich kurz geschlossenen Leitern, wie dies unsere Abbildung zeigt, wird Kurzschlußanker genannt. In der Praxis formt man den Ankerkern aus Eisen, man stellt ihn durch Zusammenpressen dünner Eisenscheiben her und erhält so einen Zylinder, in den Längsnuten eingehobelt sind, in die die Drähte zu liegen kommen. Die Drähte sind auf beiden Ankerenden mit aufliegenden Kupferscheiben oder Ringen vernietet, im übrigen haben wir einen ähnlichen Aufbau wie beim Trommelanker der Gleichstrommaschine. Abb. 46 führt uns einen derartigen Kurzschlußanker vor Augen, der sich, wie man sieht, durch große Einfachheit auszeichnet.


Abb. 46.
Kurzschlußanker.

Was das Gehäuse, also den Stator anlangt, so gibt man ihm geschlossene runde Bauart mit innen liegenden Polen. Schematisch wird dies durch Abb. 47 erläutert. Es sind drei Polpaare vorgesehen mit den gegenüberliegenden Polen I—I, II—II, III—III, sie sind wie die Pole eines Elektromagneten bewickelt, und zwar führt bei der hier angenommenen Sternschaltung jeder Anfang eines Spulenpaares zu den drei Leitern des Netzes entsprechend der Skizze links;

die übrig bleibenden Enden sind unter sich verbunden und können an den Ausgleichleiter angeschlossen werden.

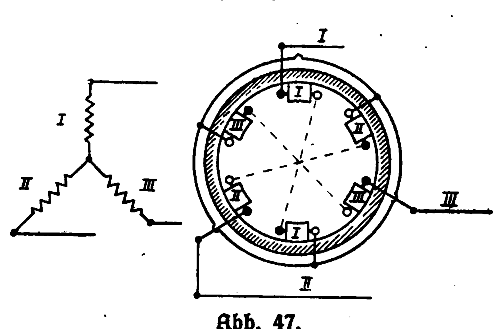


Abb. 47.
Schema der Statorwicklung.

Eine bessere Wirkung und günstigere Raumausnützung erhält man, wenn man einen jeden Pol mit Nuten unterteilt und dort die Wicklung hineinbettet. So erhält man das in Abbildung 48 dargestellte Statorgehäuse mit 24 Nuten: die vier gegenüberliegenden Polansätze bilden die Polpaare I—III. Die Wicklungsführung ist wie bei der vorigen Abbildung durch Punkte und kleine Kreise angedeutet, so, wie die Leitung nach hinten und vorne verläuft. man erkennt die Nuten und die Wicklung, deren Verbindungen am Rande herumgeführt sind, damit der innere Raum frei bleibt. Die wirksame Eisenarmatur ist unterteilt wie beim Anker.

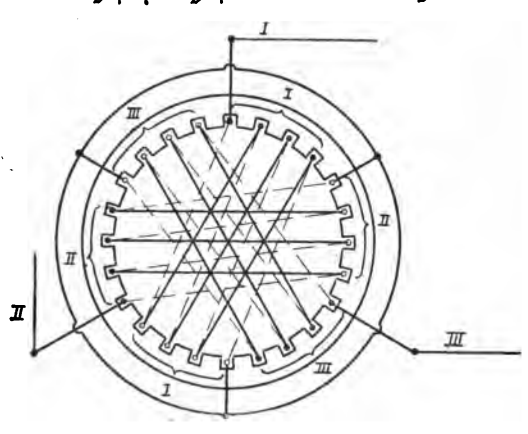


Abb. 48.
Stator mit Nutenwicklung.

Aus unseren Betrachtungen geht hervor, daß die Umlaufzahl des Rotors hinter der des Drehfeldes zurückbleiben muß, da ja sonst, bei synchronem Lauf keine Induktionsströme entstehen könnten und kein Antrieb erfolgen würde; dieses Zurückbleiben des Ankers nennt man **Schlüpfung**.

Kleinere Motoren bis zu 6 KW, also etwa 8 PS, können ohne besonderen Anlaßwiderstand in Gang versetzt werden, allerdings nur dann, wenn der Motor ohne allzu starke Last anlaufen kann, da sonst die Anlaufstromstärke, die bis zum sechsfachen des normalen Betriebsstromes ansteigt, zu lange anhält, so daß das Netz in unzulässiger Weise belastet wird. Größere Motoren müssen mit einem Anlasser versehen werden; am einfachsten läßt sich dies durch einen dreiteiligen Widerstand bewirken, der der Statorwicklung vorgeschaltet wird. Dadurch werden nun zwar Stromstöße vom Netz ferngehalten, aber die Hauptforderung bleibt unerfüllt: kräftige Anzugskraft, oder wie der technische Ausdruck lautet, hohes Anlaufsdrehmoment. Die Theorie zeigt, daß dieses proportional ist dem Quadrate der Stromstärke in der Statorwicklung und dem Widerstand im Schließungskreis des Läufers. Da nun starke Stromentnahme beim Anlassen vermieden werden soll, so wählt man das letztere Mittel und versieht den Läuferstromkreis mit einem hinreichenden Widerstand. Dazu bieten sich verschiedene Möglichkeiten. Die Wicklung des Ankers kann in zwei Stufen ausgeführt werden, eine für den normalen Lauf, die andere mit höherem Widerstand für die Anlaufsperiode. Man spricht bei dieser Ausführung vom Stufenanker. Beim Anlassen arbeitet das Drehfeld zunächst auf die Wicklung mit hohem Widerstand; ist die normale Tourenzahl erreicht, so wird mittelst eines Hebels von Hand aus, oder auch automatisch durch einen sog. Zentrifugalkurzschließer auf die normale Wicklung umgeschaltet. Soll der Motor in seiner Tourenzahl regulierbar sein, so muß man zu dem zweiten Mittel greifen und den Anker



Abb. 49.
Drehstrommotor mit Schleifringrotor.

mit drei Schleifringen ausrüsten, die mit den Enden der in Dreieck- oder Sternschaltung liegenden Wicklungsabteilungen des Ankers verbunden werden. Die auf den Schleifringen aufliegenden Bürsten sind mit einem dreiteiligen Widerstand verbunden, der zunächst als Anlasser dient, also allmählich bis zum Kurzschluß ausgeschaltet werden kann, sodann aber auch gestattet, die Tourenzahl des Motors nach unten hin zu regeln.

In Abb. 49 sehen wir einen Schleifringmotor, man erkennt deutlich die Anordnung der Schleifringe mit aufliegenden Bürsten, die durch eine Leitung mit dem Anlasser verbunden werden.

Man verwendet als Anlasser für Motoren kleinerer Leistung solche mit Drahtspulen wie bei den Gleichstrommotoren, aber mit drei Abteilungen. Für größere Leistungen wird vielfach Flüssigkeit als Widerstand eingeschaltet, da derartige Anlasser erheblich billiger sind und, da es sich hier um Wechselstrom handelt, störende Zersetzung nicht auftritt. So sehen wir in Abb. 50 einen Flüssigkeitsanlasser der Siemens-Schuckert-Werke. Durch Drehen der Kurbel wird mittelst Schneckenantriebs die Welle gesenkt, auf der drei Scheiben, gegenseitig isoliert, exzentrisch angeordnet sind, so daß diese allmählich in die Flüssigkeit eintauchen. Als Flüssigkeit dient eine Sodalösung in Wasser bei 1—4% Konzentration.



Abb. 50.
Flüssigkeitsanlasser.

Zu erwähnen ist noch der Stern-Dreieck-Anlaßschalter, bei dessen Betätigung die niedrigere Phasenspannung der Sternschaltung zuerst, darauf die höhere Hauptspannung der Dreieckschaltung angelegt wird.

In ähnlicher Weise, wie durch Phasenverschiebung dreier Wechselströme ein Drehfeld entsteht, kann man ein solches auch mittelst zweier Wechselströme erzeugen, die um ¼ Periode, also um 90° gegeneinander verschoben sind. Das Leitungsnetz für die entsprechenden Motoren muß aber aus vier gesonderten Leitern bestehen. Es läßt sich zwar auch hier eine Verkettung erzielen, so daß man mit drei Leitern auskommen würde, diese

Verkettung bietet aber nicht die Vorteile des Dreiphasenstromleitungsnetzes, daher ist der Zweiphasenstrommotor kaum im Gebrauch.

Der weitaus größte Teil der elektrischen Zentralen, die ausgedehnte Bezirke mit Elektrizität versorgen, arbeiten mit Drehstrom, so namentlich die Überlandzentralen. Für Versorgungsgebiete, deren Ausdehnung nicht allzu groß ist, bei denen aber doch Entfernungen vorkommen, die hohe Spannungen verlangen, z. B. in großen Städten, findet man häufig den Einphasenwechselstrom vertreten, der aber erst größere Verbreitung gefunden hatte, nachdem es gelungen war, Motoren zu konstruieren, die auch mit dieser Stromart einwandfrei arbeiten und die auf S. 53 erwähnten Schwierigkeiten für den Einphasenstrommotor überwunden waren. So entstanden verschiedene Motorarten, die kurz beschrieben seien.

Der Induktionsmotor arbeitet wie der Drehstrommotor dadurch, daß in den Windungen eines Kurzschlußläufers Induktionsströme erzeugt werden, er ist also im rotierenden Teil dem Drehstrommotor nachgebildet. Ein eigentliches Drehfeld existiert jedoch nicht, wir können uns aber ein solches, etwa in einem zweipoligen Gehäuse, vorstellen, dessen Magnete durch Wechselstrom erregt werden: dem Wechsel von Nord- und Südpol würde ein mit der Periode des Wechselstroms umlaufender Magnet entsprechen. Bringt man daher in ein derartig erregtes Feld einen Kurzschlußläufer, der auf eine Tourenzahl gebracht ist, die der Periode des Wechselstromes entspricht, so würde dies dem Fall eines Synchronmotors entsprechen oder dem eines Drehstrommotors, dessen Läufer die Umlaufzahl des Feldes besitzt, also keine Schlüpfung hat. Bleibt nun der Kurzschlußanker in seiner Tourenzahl hinter derjenigen zurück, die der Periode des Feldes entsprechen würde, so haben wir den Fall der Schlüpfung wie beim Drehstrommotor, in den Windungen entstehen Induktionsströme wie dort und infolgedessen antreibende Kräfte auf den Anker.

Es kommt nun noch darauf an, den Induktionsmotor beim Ingangsetzen künstlich auf die erforderliche Tourenzahl zu bringen, damit er unter dem Einfluß des Wechselfeldes weiter laufen kann. Hierzu dienen sog. Hilfspole, die beim zweipoligen Motor um 90° gegen die eigentlichen Magnetpole versetzt sind und die von Wechselstrom erregt werden, der ebenfalls gegen den

eigentlichen Betriebsstrom um 90° in der Phase versetzt ist. Dadurch entsteht ähnlich wie beim Dreiphasenstrom ein Drehfeld. Die Phasenverschiebung des Hilfsstromes erreicht man durch Abzweigung einer Nebenschlußleitung, in der durch Einbau einer Drosselspule (s. S. 66) die gewünschte Wirkung hervorgerufen wird. Ist der Motor in Gang versetzt, so wird die Hilfsleitung abgeschaltet.

Eine andere Art, den einfachen Wechselstrom zum Antrieb von Motoren zu benutzen, beruht auf der Verwendung des Gleichstrommotors mit Hauptschlußwicklung: es ist klar, daß ein solcher Motor auch mit Wechselstrom gespeist laufen muß, da ja bei Polwechsel die Umkehr des Stromes in den Ankerwindungen und Feldmagneten gleichzeitig erfolgt, der Antrieb also stets im gleichen Sinne vor sich geht. Man nennt Motoren, die auf diesem Prinzip aufgebaut sind, Reihenschluß- oder Kommutatormotoren. Die starke Induktionswirkung des Wechselstroms in den aktiven Eisenmassen des Gehäuses erfordert sorgfältige Unterteilung derselben.

Die Reihenschlußmotoren gestatten Regulierung in weiten Grenzen, sie besitzen hohes Anzugsmoment und sind deshalb im Bahnbetrieb, namentlich bei Vollbahnen, vorzugsweise in Betrieb.

Auf einem interessanten Vorgang beruht ein weiterer Vertreter von Einphasenwechselstrommotoren, der Repulsionsmotor, ebenfalls ein Kommutatormotor wie der vorige. Der Stator besitzt die Ausführung wie bei dem des Induktionsmotors, er wird von einphasigem Wechselstrom erregt. Der Rotor hat die Anordnung eines Gleichstromankers mit aufliegenden Bürsten. Diese führen den Windungen aber von außen keinerlei Strom zu, sondern sie sind unter sich kurz geschlossen. Stehen die Bürsten in der neutralen Zone und erregt man den Stator, so fließt kein Strom im Anker, dreht man sie aber über die neutrale Stellung hinaus, so wird Strom induziert und es entsteht ein Drehmoment, dessen Maximum bei Drehung der Bürsten um 45° erreicht ist. Ein besonderer Anlasser fällt bei dieser Maschine fort. —

Was die Leistung der Elektromotoren anlangt, so wurde bei den allgemeinen Ausführungen auf S. 10ff. bereits näher auf den Gang der Berechnung eingegangen. Wir sahen, daß man zur Gewinnung von 1 PS mittelst des Elektromotors etwa 1 KW aufwenden muß. Will man eine genaue Rechnung an-

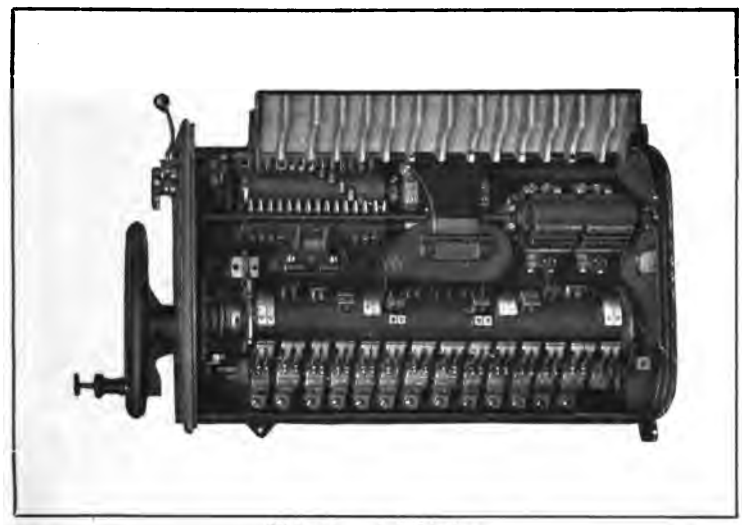


Abb. 57. Fahrschalter.

Abb. 64. Dreiphasen-Transformator der S. S. W. für eine Leistung von 16000 KVA.

Abb. 65. Transformator der S. S. W. bei der Montage der Spulen.

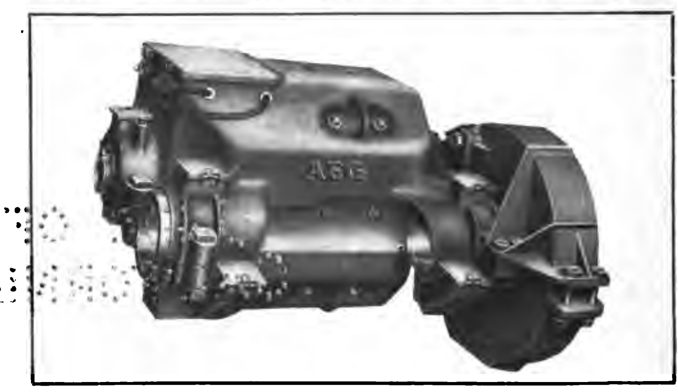


Abb. 55. Straßenbahnmotor der A. E. G.

stellen, so werden während des Betriebes Spannung und Stromstärke am Volt- und Amperemeter abgelesen, das Produkt aus beiden gibt dann die Wattzahl. Kennt man die abgegebene mechanische Leistung in PS nicht, so kann diese durch Bremsversuche festgestellt werden.

Bei Wechselstrom sind natürlich die Effektivwerte für Strom und Spannung einzusetzen. Diese ergeben sich aber ohne weiteres aus den Angaben der Instrumente. Beim Drehstrommotor erhält man die Leistung durch Multiplikation der in einem Hauptleiter gemessenen Stromstärke I mit der Phasenspannung e, weiter noch multipliziert mit 3 und dem Leistungsfaktor (s. unten) $\cos \varphi$, also $L = 3 \, e \, I \cos \varphi$. Wir sahen früher bereits, daß die Phasenspannung gleich ist der Hauptspannung E dividiert durch 1,732, wir können also auch schreiben, wenn wir e durch $\frac{E}{1{,}732}$ ersetzen $L = \frac{3}{1{,}732} \, E \cdot I \cdot \cos \varphi$. Der Bruch $\frac{3}{1{,}732}$ ergibt die Zahl 1,732, daher vereinfacht sich unsere Formel zu $L = 1{,}732 \, E \cdot I \cdot \cos \varphi$. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, daß der Strom in den drei Phasen gleich ist; in der Praxis ist diese Bedingung nicht immer streng erfüllt. Für die meisten Fälle kam man aber mit der angegebenen einfachen Formel rechnen, sowohl für Dreieck wie auch für Sternschaltung. Bei den einphasigen Motoren fällt natürlich die Zahl 3 fort und es gilt für die Spannung der Effektivwert zwischen den beiden Leitungen, also die Netzspannung; hier hat man $L = E \cdot I \cdot \cos \varphi$.

Was den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ anlangt, so verstehen wir darunter folgendes.

Es tritt nämlich bei Wechselstrom die eigentümliche Erscheinung auf, daß die Spannung nicht mit der in den Spulen — etwa eines Motors — wirkenden Stromstärke in Phase ist, sondern wegen der induzierenden Wirkung der einzelnen Spulenelemente aufeinander, der sog. Selbstinduktion, die sich infolge des veränderlichen Magnetfeldes bei Wechselstrom immer geltend macht, eine gewisse Phasenverschiebung erleidet. Es ist dies so aufzufassen, als werde bei der Stromerzeugung nach Abb. 51 die Spannung e für den Strom i in einer Spule erzeugt, die gegen die Stromspule um einen gewissen Winkel φ, dem Winkel der Phasenverschiebung versetzt ist, man sagt: die Spannung eilt dem Strom voraus. Die Größe des Winkels hängt von der Selbstinduktion ab, da diese in Spulen am stärksten auftritt, so

gilt dies auch von der Phasenverschiebung, sie kann so stark werden, daß in der Spule kein Strom wirksam wird, wenn nämlich der Winkel φ gleich 90° ist. Die Mathematik lehrt, daß in diesem Falle der cosinus des Winkels gleich 0 wird. Daraus sieht man, daß auch die Leistung nach der Formel auf Seite 65 gleich 0 wird: man spricht von wattlosem Strom. Die Kurven unter b) in Abb. 51 erläutern dies noch näher. Wir gewinnen die Leistung durch Multiplikation der Effektivwerte; diese sind nichts anderes als Mittelwerte aus den veränderlichen Strom- resp. Spannungswerten. Wollen wir einen Einblick in das innere Wesen gewinnen, so müssen wirdie aufeinanderfolgenden Werte für i und e unseren Kurven entnehmen, so wie sie durch eine zur Abszissenachse Senkrechte gegeben sind, und jedesmal deren Produkt bilden. Führt man die Rechnung aus und trägt die erhaltenen Werte graphisch auf, so erhält man das rechte Kurvenbild: der positive Betrag der Leistung wird durch den gleich großen negativen aufgehoben. Dies ist durch Schraffur gekennzeichnet.

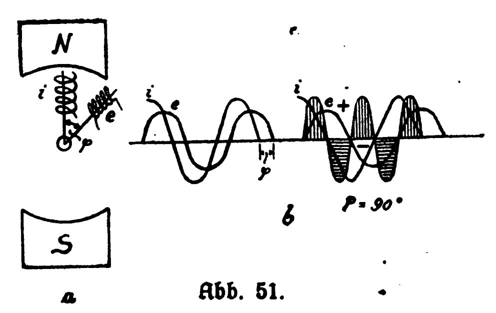


Abb. 51.
Erklärung der Phasenverschiebung.

Praktisch bedeutet dies: der gleiche Betrag der Leistung, den die Maschine während ¼ Periode abgibt, wird ihr im nächsten Viertel der Periode wieder als Nutzleistung zugeführt. Hat der Winkel φ einen kleinen Wert, so ist die zurückgegebene Leistung im Verhältnis gering; man erkennt, daß die Phasenverschiebung keinen eigentlichen Verlust darstellt, also nicht etwa wie ein Widerstand wirkt! Man benutzt deshalb in der Wechselstromtechnik vielfach Spulen mit geringem „Ohmschen" Widerstand, aber größerer oder geringerer Selbstinduktion, wenn es gilt, den Strom zu regeln; solche Spulen nennt man Drosselspulen.

Aus den vorstehenden Darlegungen, die wir nur ganz kurz halten konnten, geht hervor, daß der cos φ eine große Rolle

in der Technik spielt und daß er für die Leistung einer Maschine bestimmend ist, man nennt ihn deshalb **Leistungsfaktor.** Bei praktisch ausgeführten Maschinen normaler Bauart schwankt der Wert von cos φ zwischen 1 und 0,8.

Fünftes Kapitel.

Der Elektromotor im Dienste der Allgemeinheit, in der Industrie und im Bergbau. Die elektrischen Eisenbahnen.

Der Elektromotor ist eine ideale Maschine. Die hohe Tourenzahl ermöglicht es, wie bei der Dampfturbine, der Maschine bei großer Leistung sehr kleine Abmessungen zu geben. Motoren für kleine Leistungen lassen sich wie eine Lampe mittelst Steckers unmittelbar an die Lichtleitung anschließen, größere Motoren erhalten besonderen Anschluß mit Anlasser. Die Bedienung ist äußerst einfach, sie erstreckt sich nur darauf, in größeren Zeiträumen Ölung und Bürsten nachzusehen. Dabei ist der Elektromotor bei weitem billiger als Motoren anderer Betriebsart von gleicher Leistung und stellt an Fundament und Raum die bescheidensten Ansprüche. Alle diese Vorzüge haben bewirkt, daß der Elektromotor in zahlreichen Betrieben tätig ist und sich dort ausgezeichnet bewährt.

Auch im häuslichen Betrieb und in der Werkstatt ist er als billige und zuverlässige Kraftquelle massenhaft im Gebrauch. Mit der Einführung und dem Ausbau der Überlandzentralen ist er ferner dem Landmann ein willkommener Gehilfe. Der elektrische Strom, der ihm früher nur bekannt wurde auf Kirchweihfesten und Jahrmärkten, wo mittelst geheimnisvoller Apparate seine Glieder elektrisiert, von unsichtbarer Gewalt gepeinigt wurden, ist heute sein bester Freund geworden. Die Überlandzentrale liefert diesen wunderbaren Stoff in die entferntesten Gegenden, auf das einsamste Gehöft und spendet gegen mäßige Gebühr Licht und Kraft. Wo früher bei trübem flackernden Licht der Stallaterne Hof und Scheune notdürftig beleuchtet wurde, da erstrahlt jetzt das elektrische Licht unbekümmert um Sturm und Wetter. Und der weißglühende leuchtende Feuerkörper kann nur leben in der Glaskugel, die ihn umschließt; zerspringt

diese, so ist auch sein Leben erloschen, ehe es ihm möglich wird, Feuersgefahr hervorzurufen. Mit Wohlbehagen betritt der Bauersmann die hellerleuchtete Scheune und mit nicht geringem Selbstbewußtsein läßt er den Motor an, der ihm spielend die Maschinen antreibt, die früher durch Menschenhand oder schwerfälliges Göpelwerk in Gang versetzt werden mußten.

Abb. 52 (auf Tafel VIII) führt uns eine auf einem Handkarren montierte Jauchepumpe vor Augen, die elektrisch angetrieben wird und ein Faß von 750 Litern Inhalt in 4 Minuten füllen kann; die Stromkosten betragen nur 1 Pfennig!

Im Bergbau benutzt man schon seit einer Reihe von Jahren Stoßbohrmaschinen zum Eintreiben der Sprenglöcher. Zum Antrieb verwendete man, wie dies auch heute in gewissen Fällen noch geschieht, Preßluft, die den einzelnen Bohrstellen von einer gemeinsamen Kompressoranlage aus mittelst Rohrleitungen zugeführt wird. Diese Rohrleitungen bilden indes den wunden Punkt der Preßluftanlage, da sie schwerfällig und umständlich sind und namentlich die freie Ortsbeweglichkeit der Bohrmaschine erschweren. Obwohl der Preßluft der Vorzug der Lufterneuerung zukommt, was namentlich bei unterirdischen Bauten wertvoll ist, wird sie doch mehr und mehr durch die Elektrizität verdrängt, die dem Motor ohne die geringsten Schwierigkeiten durch Kabel zugeführt werden kann.

Die Stoßbohrmaschine mit dem Antriebsmotor ist auf ein Gestell montiert, das aus vier unten mit schweren Eisenmassen versehenen Füßen besteht, die einen hinreichenden Gegenhalt gewähren. Wir sehen in Abb. 53 (auf Tafel VII) eine Siemenssche Stoßbohrmaschine bei der Arbeit. Durch Schwenken der Aufhängevorrichtung um die wagerechte Achse lassen sich in gleicher Weise vertikale Löcher bohren.

Eine außerordentlich wichtige Rolle spielt der Elektromotor im modernen Transportwesen. Zuerst fand er Eingang im Straßenbahnbetrieb, wo er sich vorzüglich bewährte. Dann hielt er seinen Einzug in den Betrieb der Hoch- und Untergrundbahnen, deren ungeheure Entwicklung ihm allein zu danken ist. Mehr und mehr verschwanden die Dampflokomotiven mit ihrem Ruß und Funkenauswurf aus dem Straßenbild der Großstädte, und ernsthaft hat man daran gedacht, die elektrische Triebkraft voll an ihre Stelle zu setzen. Die sich anfangs einstellenden technischen Schwierigkeiten sind heute überwunden, so daß es kein Wagnis mehr war,

als man daran ging, ausgedehnte Strecken der Staatseisenbahnen unter ausschließlich elektrischen Betrieb zu nehmen. Die Strecke Dessau-Bitterfeld, ein Teil der Hauptstrecke Magdeburg-Halle, hat den vollgültigen Beweis dafür erbracht, daß Betriebssicherheit und Leistung die alte Betriebsart bei weitem übertrifft, so daß man hoffen kann, daß ein Ausbau in größerem Maßstab als bisher nach dem Kriege vorgenommen wird.

Im Jahre 1879 setzte Werner v. Siemens die erste elektrisch betriebene Versuchsbahn in Betrieb. Die elektrische Kraftübertragung war eines der großen Ziele, dem dieser geniale Techniker rastlos zustrebte und an der Entwicklung dieses Betriebszweiges kommt ihm ein großes Verdienst zu. Von jener Versuchsbahn bis zum elektrischen Bahnbetrieb in der heutigen Vollkommenheit war freilich noch ein weiter Weg, und die zu überwindenden Schwierigkeiten waren nicht gering. Zum großen Teil waren diese in der Art der Stromzuführung begründet, die sich zu einer ganz neuen und besonderen Technik entwickelte.

Was zunächst den Motor anbelangt, so kommt ihm die günstige Eigenschaft des Elektromotors zugute: der kleine Raum bei großer Arbeitsleistung und die Anspruchslosigkeit bezüglich der Bedienung. So ist es möglich, den Motor für die Straßenbahnwagen unter dem Wagenkasten unmittelbar auf dem Fahrgestell anzubringen. Wie dies erreicht ist, zeigt uns am besten Abb. 54 (auf Tafel IV) an einer Ausführung der A. E. G. Wir erkennen dort das Motorgehäuse zwischen den Rädern; es ist einerseits federnd mit dem Fahrgestell verbunden, andererseits ruht es in Lagern auf der Achse der Triebräder. Abb. 55 (Tafel VI) zeigt den Motor in geschlossenem Zustande, Abb. 56 geöffnet. Im Deckel erkennt man links die Bürstenhalter mit Bürsten, rechts zwei Magnetspulen für die Felderregung, dazwischen eine Wendepolspule zur Erzielung eines funkenfreien Laufs. Die Tourenzahl des Ankers wird mittelst einer Zahnradübertragung, die auf das Triebrad wirkt, herabgesetzt und dafür die Zugkraft erhöht. Das große Zahnrad ist, wie der Motor, durch Gehäuse gegen Staub und Feuchtigkeit geschützt, wodurch auch gute Schmierung gewährleistet ist.

Wie bei jedem Motor größerer Leistung ist auch beim Straßenbahnmotor ein Anlasser nötig. Dieser befindet sich am Führerstand; er wird Fahrschalter oder auch Kontroller genannt und in der bekannten Weise mittelst Kurbel betätigt. Der Fahr-

schalter enthält eine Walze, auf der sich Kontaktklötze befinden, die bei Betätigung der Kurbel Widerstände, die sich im Innern des Wagens, unter den Bänken und an sonst geeigneten Stellen befinden, ein- oder ausschaltet. Soll der Wagen rückwärts fahren,

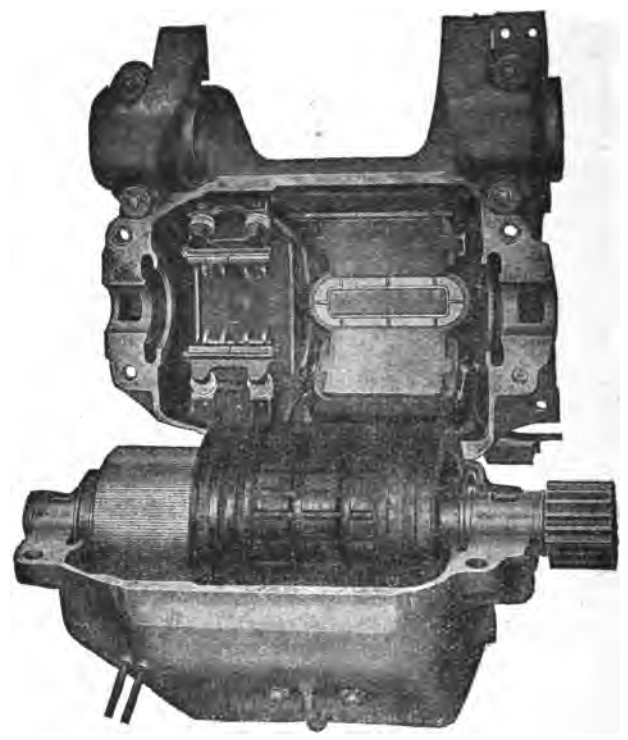


Abb. 56.
Straßenbahnmotor geöffnet.

so wird durch Kurbelbewegung die Stromrichtung im Anker umgekehrt, während die Magnete ihre Pole beibehalten; dadurch ändert sich der Drehsinn des Ankers. Es kann ferner noch am Fahrschalter die „elektrische Bremse" eingeschaltet werden. Dies geschieht so, daß der Motor als Stromerzeuger umgeschaltet wird; dieser wird durch die Wucht des Wagens angetrieben und liefert Strom, der in Widerstände geleitet und in Wärme um-

gesetzt wird oder, namentlich bei langen Gefällen, unter Nutzbarmachung auf das Netz zurückwirkt. Die hierzu erforderliche große Arbeitsleistung übt eine starke Bremswirkung aus. Abb. 57 (auf Tafel V) gewährt einen Blick in das Innere des Fahrschalters eines von der A. E. G. ausgerüsteteten Wagens.

Der elektrische Straßenbahnwagen ist heute fast ausnahmlos an Stelle jener Dampfwagen getreten, die früher zum Betriebe kleiner Linien dienten. Das ist leicht verständlich, wenn man bedenkt, welch große Vorteile jenes System diesem gegenüber bietet: die saubere Art des Betriebes, die einfache Bedienung, die es ermöglicht, in kurzer Zeit Nichtfachleute, ja Frauen, in der Bedienung auszubilden u. a. m. Bei den Fernbahnen, die entfernt liegende Ortschaften miteinander verbinden, ist es nötig, die Betriebsspannung zu erhöhen. Aus technischen Gründen zieht man auf derartigen Strecken den Gleichstrom vor, kann aber hier die Spannung von 2000 Volt nicht überschreiten. Diese verhältnismäßig hohe Spannung ist indessen in den Städten sowie in bewohnter Gegend unzulässig, da sie eine große Gefahr bei etwaiger Berührung des Leitungsdrahtes in sich schließt. Deshalb ist ihre Verwendung nur auf der freien Strecke erlaubt, an deren Grenze die hohe Spannung auf die normale Spannung des Straßenbahnnetzes von 5—600 Volt umgeschaltet wird. Eine entsprechende Schaltung wird gleichzeitig an den Motoren und Lampen vorgenommen; waren diese bei der hohen Spannung in Serie geschaltet, so erfolgt jetzt die Schaltung in parallele Gruppen, so daß ihnen die normale Betriebsspannung erhalten bleibt.

Die Frage nach der Einführung des elektrischen Betriebes für die Vollbahnen wurde schon kurz gestreift. Der allgemeinen Einführung indessen stellen sich noch Hindernisse entgegen: die strategischen Bedenken und die gewaltigen Kosten, die mit der gänzlichen Umwälzung verbunden sein würden. Die großen Entfernungen, die zurückzulegen sind, sowie die mit großer Geschwindigkeit zu befördernden beträchtlichen Lasten bedingen wesentliche Abweichungen von dem System des gewöhnlichen Straßenbahnbetriebs. Aus Gründen, die bei Besprechung der Fernleitung elektrischer Energie eingehend dargelegt sind (Kap. VI), ist es notwendig, mit hoher Wechselstromspannung zwischen Fahrdraht und Schiene zu arbeiten, ferner fordert die große Arbeitsleistung die Einstellung besonderer Lokomotiven.

Auf der oben erwähnten voll ausgebauten Strecke Dessau-

Bitterfeld wird der Strom dem Fahrdraht mit einer Spannung von 10000 Volt geliefert; er gelangt darauf zu dem im Innern der Lokomotive befindlichen Transformator und wird dort in die Betriebsspannung von 100 Volt umgewandelt. Durch Schalt- und Regelvorrichtungen, die im einzelnen zu beschreiben hier zu weit führen würde, gelangt der Strom sodann zum Motor. Es ist dies ein sog. Kommutatormotor nach Art des auf S. 64 beschriebenen Reihenschlußmotors, der in seinen wesentlichen Teilen in Abb. 58 (auf Tafel III) zu sehen ist. Man erkennt das Magnetgehäuse und rechts davon den Bürstenhalter, der, den 16 Polen entsprechend, mit 16 Bürstengruppen versehen ist, die rings im Kreise herum angeordnet sind und auf dem Kollektor schleifen. Die Zahnradübertragung fällt hier fort, es wird vielmehr die Kraft des Motors direkt vermittelst Kurbel und Schubstange auf die sog. Blindwelle übertragen und von hier aus gelangt die Kraft durch Vermittlung von Gelenkstangen in der üblichen Weise an die Räder. Abb. 58 (auf Tafel IV) veranschaulicht eine A. E. G.-Schnellzugslokomotive, die imstande ist, 1200 PS zu entwickeln bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. $80 \frac{\text{km.}}{\text{St}}$. Die größte Zugkraft beläuft sich auf 9500 kg.



Abb. 60.
Klemmvorrichtung für den Fahrdraht.

Einen sehr wesentlichen Teil des elektrischen Bahnbetriebes bildet die Stromzuführung. Vorwiegend finden wir diese als Freileitung ausgeführt derartig, daß der Strom einem frei gespannten Fahrdraht mittelst eines Bügels entnommen wird, worauf er dann durch die Schiene wieder zur Zentrale zurückgelangt. Der Fahrdraht wird mittelst einer Klemme gefaßt und unter geeigneter Isolation von quer zum Bahndamm gespannten Drähten oder von den Auslegern der Masten getragen. Damit sich der stromabnehmende Bügel oder die Rolle des Fangarms frei unter der Klemme hinwegbewegen kann, wird dem Querschnitt des Fahrdrahtes die Form einer 8 gegeben, wie dies Abb. 60 vor Augen führt.

In den Fällen, wo größere Geschwindigkeit entwickelt wird, wie bei Fernbahnen, Staatseisenbahnen, ist das Durchhängen der frei gespannten Drähte zu verhüten. Wie dies bewirkt wird, erklärt Abb. 61, die eine Kettenaufhängung darstellt. Die Fahrleitung, in diesem Falle zur Vergrößerung des Querschnitts zwei nebeneinander gespannte Drähte, wird durch eine Anzahl senkrechter Drähte, die an einem längs der Fahrleitung gespannten Tragdraht hängen, möglichst wagerecht ausgerichtet.

Das gesamte Bahnnetz ist in eine Anzahl Teilstrecken eingeteilt, von denen eine jede durch eine besondere Speiseleitung unter Strom gesetzt werden kann. Diese Speiseleitungen haben

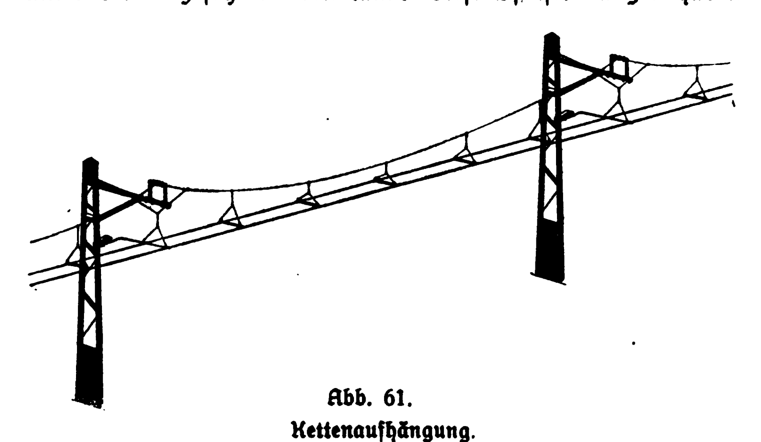


Abb. 61.
Kettenaufhängung.

den Zweck, den Betrieb aufrecht zu erhalten, wenn irgendwo eine Unterbrechung, etwa durch Reißen des Fahrdrahtes, eintritt; sie dienen ferner dazu, den Fahrdraht vor Überlastung zu bewahren.

Die Schiene und das feuchte Erdreich übernehmen die Rückleitung des Stromes. Die Schienenstöße sind zur Vermeidung von Übergangswiderständen durch kupferne Bügel metallisch miteinander verbunden. Bei Verlegung in Pflaster, wo die Schiene im Sommer keine hohe Temperatur annehmen kann und starke Dehnung nicht eintritt, wird in neuerer Zeit mit gutem Erfolg die Stoßstelle zweier Schienen durch ein besonderes Verfahren zusammengeschweißt.

Die elektrischen Hochbahnen und solche, die einen eigenen,

gegen Unbefugte abgesperrten Bahnkörper besitzen, sind zur Strombelieferung mit der sogenannten dritten Schiene ausgerüstet. Diese läuft in einer gewissen Höhe, sorgfältig gegen die Erde isoliert, und mit einer Schutzabdeckung versehen, parallel den Fahrschienen. Ein kurzer Schleifbügel, federnd mit dem Fahrgestell des Wagens verbunden, berührt die Schiene und entnimmt so den Strom.

In gewissen Städten, in denen man die vielen Drähte der Freileitung störend empfindet, ist die unterirdische Stromzuführung angewandt, bestehend aus einer Art dritten Schiene, die in einem Kanal parallel den Fahrschienen unter dem Pflaster untergebracht ist. Der Fangarm greift durch einen Spalt hinein und steht so mit der Schiene im beständigen Kontakt. Der Betrieb ist elegant, aber äußerst kostspielig bei der Anlage.

Endlich ist noch der elektrischen Triebwagen Erwähnung zu tun. Diese finden sich vielfach bei den normalspurigen Staatsbahnen und dienen zur Bewältigung des lokalen Verkehrs. Es sind elektrische Wagen, die eine Akkumulatorenbatterie mit sich führen, deren Gewicht bei diesen großen, ruhig fahrenden und ohnedies sehr schweren Wagen keine so große Rolle spielt. Die Batterie liefert den Strom für den Antrieb und für die Beleuchtung; sie muß natürlich nach gewissen Fahrleistungen neu aufgeladen werden. Der Aktionsradius ist daher beschränkt; da diese Wagen aber nur den Verkehr durch das Gelände zwischen verhältnismäßig nahe gelegenen Hauptpunkten vermitteln, so bildet die Begrenzung der Stromabgabe kein Hindernis, während andererseits der Betrieb außerordentlich bequem vonstatten geht und auf jeder Dampfbahnlinie ohne besonderen Oberbau möglich ist.

Sechstes Kapitel.

Die Verteilung des elektrischen Stromes, das Dreileitersystem, das Netz der Überlandzentralen. Installationswesen.

Es liegt im Wesen des elektrischen Stromes, daß er sich mit praktisch unendlich großer Geschwindigkeit von einem Ort zum anderen bewegt, falls ihm dazu ein Leiter zur Verfügung steht; das Problem der Übertragung ist also an sich recht einfach. Für

die Starkstromtechnik sind aber bezüglich der Leitung zwei Bedingungen zu erfüllen: gute Isolation, damit der Strom keine verbotenen Wege wandelt, ferner passende Wahl des Materials und dessen Dimensionierung, damit die auftretenden Verluste ein Minimum bleiben. Was die Isolation anlangt, so muß sich diese der Spannung der stromführenden Teile anpassen. Heute sind die sich bietenden Schwierigkeiten überwunden, und die Technik hat ein System geschaffen, das wohl als vollkommen bezeichnet werden kann. Die Einzelheiten werden wir weiter unten besprechen; vorerst wollen wir den zweiten Punkt behandeln, nämlich die Frage nach der zweckmäßigsten Ausgestaltung des Leitungssystems.

Der wichtigste Faktor bei der Einrichtung einer Zentrale zur Versorgung größerer Gebiete mit elektrischem Licht und elektrischer Kraft bildet die Rentabilität. Eine Unmenge einzelner Dinge hat der Erbauer zu berücksichtigen, nicht allein bezüglich der Beschaffung des Betriebsmaterials, sondern vor allem auch hinsichtlich der Forderung, die mit dem Betriebe dauernd verbundenen Verluste auf ein Minimum zu beschränken. Ein klares Bild über die Verhältnisse im Leitungswesen gewinnen wir an Hand einer kurzen theoretischen Betrachtung. Wir sahen früher (S. 9), daß die elektrische Energie dargestellt wird durch das Produkt aus Spannung und Stromstärke, also der Anzahl Watt: $L = E \cdot I$. Eine bestimmte Arbeitsleistung fordert mithin einen bestimmten Wert der einzelnen Faktoren des Produkts $E \times I$, d. h. wird E vergrößert, so verkleinert sich im gleichen Maße der Wert für I; das Produkt bleibt dann unverändert. Wir sahen ferner, daß der elektrische Strom stets beim Durchströmen eines Leiters Wärme hervorruft, weil er den auch im besten Leiter immer vorhandenen Widerstand überwinden muß, und daß die entwickelte Wärmemenge nach dem Gesetz von Joule proportional ist dem Quadrate der Stromstärke und dem Widerstand des Leiters, in dem der Strom fließt. Daraus erkennen wir sofort, daß es, um die Wärmeverluste zu verringern, bei einer Anlage zweckmäßig ist, die Stromstärke möglichst niedrig zu halten, anstatt den Widerstand zu verkleinern, da die Verluste mit dem Quadrate der Stromstärke abnehmen. Eine Verkleinerung des Widerstandes würde, da die Länge der Leitung gegeben ist, eine Vergrößerung des Leiterquerschnitts bedeuten, also mit vermehrten Kosten verbunden sein. Nehmen wir einmal ein Beispiel. Es seien

400 Watt zu übertragen, wir vergleichen die Verluste bei verschiedenen Spannungen relativ miteinander; der Widerstand sei gleich 1, dann hat man folgende Übersicht:

Spannung E	Stromstärke I	Verlust
50 Volt	8 Ampere	$1 \times 8^2 = 64$
100	4	$1 \times 4^2 = 16$
200	2	$1 \times 2^2 = 4$
400	1	$1 \times 1^2 = 1$

d. h. also: verdoppeln wir die Betriebsspannung, so betragen die Verluste durch Joulesche Wärme nur ¼ derjenigen der einfachen Spannung; die 8fache Spannung vermindern diese auf den 64ten Teil!

Unsere Betrachtungen lehren also: Damit bei Übertragung einer bestimmten Arbeitsleistung die Verluste in der Leitung ein Minimum werden, muß man die Spannung erhöhen, und man geht hierin soweit, wie dies irgendwie möglich ist. Dieser Möglichkeit sind aber, sofern es sich um Gleichstrom handelt, bestimmte Grenzen gesteckt, über die man nicht hinaus kann. Anders bei Wechselstrom. Diese Stromart läßt sich, einmal erzeugt, in einfachster Weise und mit geringen Verlusten in die höchste Spannung umwandeln und wieder zurücktransformieren. Betrachten wir zunächst die Verhältnisse bei Gleichstrom.

Gleichstrom läßt sich zwar durch Gruppierung einzelner Maschinen, sogenannter Maschinenaggregate, bis zu mehreren tausend Volt Spannung erzeugen; allein diese hohe Spannung kann nur in besonderen Fällen (z. B. bei elektrischen Fernbahnen) unmittelbar zum Betriebe benutzt werden, für den normalen Betrieb ist sie wegen der außerordentlichen Gefahr für Gesundheit und Leben völlig unbrauchbar; ferner ist es praktisch nicht möglich, Glühlampen oder Motoren für derartig hohe Spannung zu konstruieren. Die höchste praktisch gebräuchliche Spannung beträgt heute bis zu 500, die normale 440 Volt. Diese Spannung ist aber noch zu hoch zum unmittelbaren Betrieb von Lampen, die bis höchstens 250 Volt geliefert werden. Um aber dennoch der eigentlichen Stromversorgung die höhere Spannung von 440 Volt zugute kommen zu lassen, hat man das sogenannte

Dreileitersystem ersonnen, das heute ganz allgemeine Verbreitung gefunden hat. Diesem System liegt die Spannungsteilung in zwei Hälften zugrunde. Das Elektrizitätswerk erzeugt den Strom unter 440 Volt Spannung. Die Stromquelle ist aber unterteilt, wie man etwa eine Batterie galvanischer Elemente unterteilen kann. Denken wir uns z. B. 100 galvanische Elemente von je 1,4 Volt Spannung hintereinander geschaltet, so herrscht an den freibleibenden Polen die Spannung von 140 Volt. Es ist klar, daß zwischen dem positiven Pol und einer Abzweigung in der Mitte der Batterie, also nach 50 Elementen die Hälfte der Spannung herrscht, also 70 Volt, und ebenso zwischen dieser Abzweigung und dem negativen Pol. Je nachdem man also die beiden Außenleiter benutzt oder je einen Außenleiter und den Mittelleiter hat man 140 oder 70 Volt; man kann sowohl die eine wie die andere Hälfte benutzen, eine gegenseitige Störung tritt nicht auf.

Die Spannungsteilung findet in den Elektrizitätswerken entweder an der Maschine oder an der Akkumulatorenbatterie statt[1]), derartig, daß zwischen dem positiven Pol und der Abzweigung eine Spannung von 220 Volt herrscht, und ebenso zwischen der Abzweigung und dem negativen Pol. Die Abzweigstelle wird mit einem Drahte verbunden, der ohne Umhüllung blank mit den beiden anderen Leitern, dem positiven und negativen Außenleiter, in die Erde verlegt wird. Der mittlere Leiter, der also gegen die Erde keine elektrische Spannung zeigt, wird Null, neutraler oder auch Ausgleichsleiter genannt. Man erkennt, daß der Nulleiter auf dem Wege zur Zentrale stromlos ist, wenn die Hälften der beiden Außenleiter gleichstark belastet sind. Dieser Zustand wird bei der Installation angestrebt, da er aber natürlich nicht vollkommen zu erreichen ist, so führt der Nulleiter den Überschuß aus der einen oder anderen Hälfte, er gleicht aus. Motoren schließt man an die höhere Spannung, also an beide Außenleiter an, da sie sich ohne Schwierigkeit für 440 Volt bauen lassen.

Auf größere Entfernung versagt der Gleichstrom vollständig, da sich die Spannungsverluste zu stark geltend machen; an seine Stelle tritt der Wechselstrom. Dieser hat dem Gleichstrom gegenüber den Vorzug, daß er ohne große Verluste und mittelst einfacher

---

[1]) Näheres s. Kapitel Acht über elektrische Zentralen.

Transformatoren, die keinerlei bewegliche Teile besitzen, in Strom von höherer oder niedrigerer Spannung umgewandelt werden kann. Dies ist der Grund, weshalb diese Stromart für die Übertragung auf große Entfernungen allein in Frage kommt. Unter verhältnismäßig niedriger Spannung erzeugt, wird er in den Transformator geleitet und verläßt diesen als hochgespannter Strom, um in die Fernleitung zu gelangen. An der Verbrauchsstelle findet dann wieder der umgekehrte Vorgang statt, die hohe Spannung der Fernleitung wird in die niedrige Gebrauchsspannung von 220 oder 110 Volt umgeformt und dem Verteilungsnetz zugeführt.

Wie sieht denn nun ein solcher Transformator aus, und worauf beruht seine Wirkungsweise? Die Wirkung des Transformators beruht auf der Induktion, deren Wesen uns ja aus früheren Besprechungen genau bekannt ist; das Prinzip soll Abb. 62 erläutern. Ein eiserner Kern K, der zur Verhütung der Wirbelstrombildung aus unterteiltem Eisen hergestellt ist, ist mit einer Spule umwickelt, die aus wenig Windungen dicken Drahtes besteht. Diese Spule wird von einem starken Wechselstrom niedriger Spannung, dem Primärstrom, durchflossen. Auf diese Primärspule P ist die Sekundärspule S aufgewunden, die aus sehr vielen Windungen dünnen Drahtes besteht. Der primäre Wechselstrom erzeugt nun in dem Raume, der von den Windungen der Sekundärspule eingenommen wird, ein Magnetfeld von fortwährend wechselnder Stärke und Polarität, so wie es der Periode des Wechselstromes entspricht. Dadurch entsteht in den Windungen der Sekundärspule ein Induktionsstrom gleicher Periode, dessen Spannung aber von der Anzahl der Windungen abhängt. Da diese sämtlich hintereinander liegen, zu einer Spule aufgewunden sind, so müssen sich die in den einzelnen Windungen induzierten elektromotorischen Kräfte summieren. Man erkennt, daß man so in der Lage ist, durch Anhäufen der Windungen im Sekundärstromkreis eine gegebene Spannung beliebig hoch hinaufzutransformieren. Die Höhe der Sekundär-

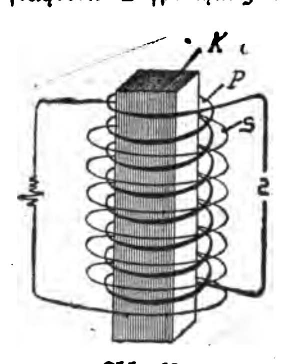


Abb. 62.
Bau des Transformators.

spannung findet praktisch ihre Grenze in der Schwierigkeit der Isolation, die überhaupt ganz besonders sorgfältig ausgeführt werden muß und besondere Maßnahmen fordert.

Die in unserer Abbildung dargestellte Form des eisernen Kerns mit offenen Polen wird in der Praxis nicht benutzt, da an den freien Enden ein großer Teil der Kraftlinien in den Raum hineingestreut wird und dort für die Wirkung verloren geht. Man verwendet deshalb geschlossene pollose Systeme derartig, daß ein oder mehrere Kerne durch Schlußjoche zu einem geschlossenen System vereinigt werden. Je nach der Bauart hat man Kern oder Manteltransformatoren; beim Kerntransformator sind die Spulen um einen eisernen Kern gewunden, beim Manteltransformator sind sie auch noch außerhalb von Eisen umschlossen. In der Technik spricht man auch von Hoch- und Niederspannungsspule; diese Bezeichnung ist korrekter, da im Transformatorenwesen sowohl Hochspannungs- wie auch Niederspannungsspule primär resp. sekundär sein kann.



Abb. 63 a.
Gerüst des Drehstromtransformators.

Aus Abb. 63 a) ersehen wir den Aufbau eines Drehstromtransformators der S. S. W. Die Kerne sind aus legierten Blechen hergestellt, die behufs guter Isolation gegen die aufzuschiebenden Spulen mit Preßspan umgeben sind; b) läßt erkennen, wie nach Unterbringung der Spulen, das eiserne Schlußjoch aufgesetzt wird, indem die einzelnen Bleche in die Zwischenräume der Kerne eingeschoben werden, worauf das Ganze fest miteinander verschraubt wird.

Die bestmögliche Ausnutzung der induzierenden Wirkung macht es notwendig, die Spulen im engen Raum unterzubringen und das Ganze zu einem eng geschlossenen Körper zu vereinigen.

Es tritt daher beim Betrieb eine nicht unerhebliche Joulesche Wärme auf, die nicht durch Luftkanäle entfernt werden kann. Transformatoren für größere und besonders für große Leistungen werden deshalb in ein Ölbad eingesenkt, das unter Umständen durch Wasserkühlung auf niedriger Temperatur gehalten wird; man nennt diesen Typ Öltransformator. Zu welch riesigen Dimensionen man beim Bau von Transformatoren gelangt ist, darüber gibt Abb. 64 (auf Tafel V) ein Bild. Wir sehen hier einen dreiphasigen Öltransformator in der Montagehalle der S. S. W.; er ist für eine Leistung von 16000 KVA bei einer Höchstspannung von 75000 Volt bestimmt! Die folgende Abb. 65 (auf Tafel VI) veranschaulicht den Einbau der Spulen, die scheibenförmig ausgebildet sind.

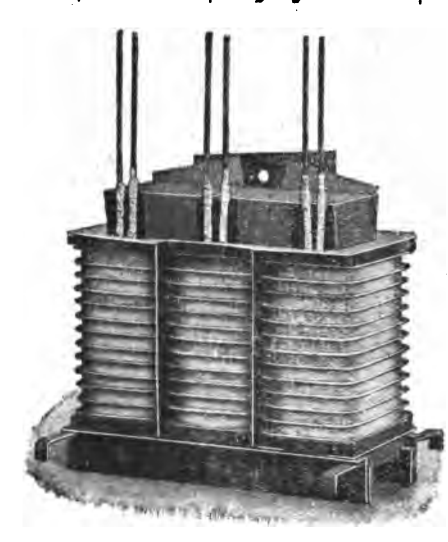


Abb. 63b.
Aufbringen des Schlußjochs.

Im normalen Betrieb findet bei Wechselstromanlagen eine zweimalige Transformation statt: die Maschinenspannung wird in die Fernleitungsspannung umgesetzt und diese dann am Orte der Verwendung in die niedrige Betriebsspannung. Die Technik muß darauf bedacht sein, daß bei dieser doppelten Transformation die Verluste so gering bleiben, daß sie keinern wesentlichen Faktor darstellen. Dies ist auch in der Tat erreicht, indem die elektrischen Verluste bei guten Transformatoren und normaler Belastung etwa 5% betragen. Kraftverzehrend sind die in den aktiven Eisenmassen auftretenden Wirbelströme; wir sahen aber bereits bei Besprechung der Dynamomaschinen, wie man diesem Übelstand durch sorgfältige Unterteilung des Eisenkörpers begegenet. Durch Zusatz von Silizium zum Eisen wird ferner erreicht, daß



Abb. 85 b. Bogenlampe mit Prismenglas.

Abb. 53. Elektrisch angetriebener Bohrer im Bergbau.

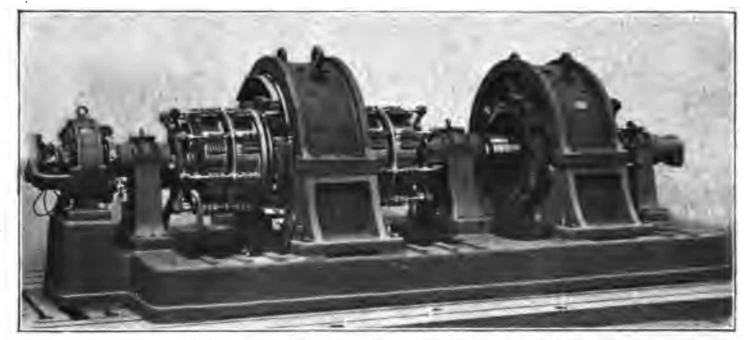


Abb. 95. Pirani-Gruppe der S. S. W.

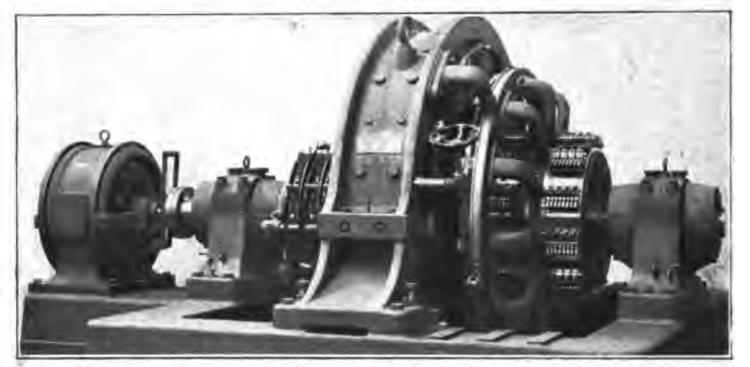


Abb. 98. Einanker-Umformer der S. S. W. mit Anwurfmotor.



Abb. 52. Elektrisch angetriebene Jauchepumpe.

die Magnetisierung nahezu mit dem Wechselstrom in Phase ist, wodurch das störende Nachbleiben des Magnetismus, die Hysteresis, auf einen minimalen Betrag herabsinkt.

Der auf die Betriebsspannung transformierte Strom, meist 110 Volt, ist völlig ungefährlich, und die Berührung leitender Teile zieht keine ernsten Folgen nach sich. Anders sieht es freilich aus mit der Spannung in den Fernleitungen, die heute bis zu 110000 Volt hinaufgeht. Hier ist jede Berührung unbedingt tödlich und entsprechende Bezeichnungen an den Leitungsmasten warnen vor mutwilliger und unbedachter Berührung. Dem ungeheuren Drucke folgend sucht natürlich auch der elektrische Strom zu entweichen, wo immer Gelegenheit dazu sich bietet; er sucht die Schranke zu durchbrechen, die ihn von der Erde trennt, um, dem Blitze gleich, dort einzutauchen und mit dem neutralen Erdreich die gewaltige Spannung auszugleichen.



Abb. 66.
Freileitungsisolator.

Dies zu verhindern ist Aufgabe der Isolationstechnik. Bei Freileitungen muß auf Regen und Feuchtigkeit Rücksicht genommen werden, denn Wasser ist der gefährlichste Feind einer jeder guten Isolation. Abb. 66 führt uns einen Freileitungsisolator der A. E. G. vor Augen. Der Isolationskörper ist mit drei Rippen versehen, deren oberste über die unteren hinüberragt, um Benetzung durch Tropfwasser nach Möglichkeit zu vermeiden. Diese Ausführung verhindert wirksam die Ablagerung von Feuchtigkeit und erhält selbst bei Regengüssen trockene Stellen, die der Strom nicht zu überbrücken vermag. Das Material muß hinreichend starkwandig sein, damit infolge der hohen Spannung kein Durchschlag erfolgt. Die Materialien werden vor dem Einbau sorgfältig auf die doppelte oder noch höhere Durchschlagsfestigkeit geprüft. Eine solche Probe veranschaulicht Abb. 67, die uns einen A.E.G.-Isolator vor Augen führt (für gedeckte Räume), der für eine normale Betriebsspannung von 77000 Volt gebaut ist.

Bei einer Überspannung von 170000 Volt erfolgte die Entladung des stromführenden Teils zum Isolationsträger in Form mächtiger Funken und Flammenbüschel.

Die Freileitungen sind im hohen Grade atmosphärischen Entladungen, wie sie beim Gewitter auftreten, ausgesetzt, die Anlagen sind daher mit sicher wirkenden Blitzschutzvorrichtungen zu versehen. Diese müssen so beschaffen sein, daß dem Blitz, wenn er in die Leitung einschlägt, ein ungehinderter Weg zur Erde geboten wird. Andererseits ist darauf zu achten, daß der Betriebsstrom nicht auch seinen Weg dauernd zur Erde nimmt, nachdem die atmosphärische Elektrizität abgeflossen ist. Hier hat sich der „Hörnerblitzableiter", der sich auch durch seinen einfachen Bau auszeichnet, vorzüglich bewährt. Wir sehen in Abb. 68 a) die Einrichtung, in b) die Schaltung dieses Blitzableiters. Infolge der hohen Spannung des Blitzes bietet ihm der Luftraum zwischen den beiden Hörnern keinen Widerstand; hat er die Leitung getroffen, so gelangt er dort ungehindert zur Erde (b). Der Betriebsstrom würde nun freilich auch auf dem einmal angebahnten Wege zur Erde strömen unter dauernder Beibehaltung eines Lichtbogens am Fuße der Hörner. Dieser Lichtbogen (s. a. Bogenlampen, S. 100) verhält sich wie ein stromdurchflossener beweglicher Leiter, der infolge der elektrodynamischen Wirkung (Elektrodynamometer, S. 22) eine Abstoßung durch die feststehenden Hörner erleidet, d. h. er wird nach oben in den erweiterten Teil getrieben, so daß er, wegen des großen Luftwiderstandes, dort erlischt.

Abb. 67.
Wirkung der Überspannung.

In Gegenden, wo sich dauernd Menschen aufhalten, ist die frei gespannte Hochspannungsleitung mit zu großer Ge-

fahr verknüpft und deshalb nicht erlaubt. Mit Rücksicht auf die Betriebssicherheit vermeidet man sie ferner an Stellen, wo leicht Beschädigung möglich ist, wie in waldiger Gegend, in Schluchten, wo durch herabfallendes Gestein oder durch Schneemassen die Leitung zerstört werden könnte. Hier zieht man die Kabelverlegung vor. Freilich ist diese mit weit größeren Kosten verknüpft, sie stellt aber andererseits keine Ansprüche an die Unterhaltung. Der Bau eines Kabels, das hohen Durchschlagsspannungen ausgesetzt ist, erfordert das beste Material und die sorgfältigste Bearbeitung. Abb. 69 stellt uns ein Kabel der A. E. G. im Durchschnitt dar, das für dreiphasigen Drehstrom von 30000 Volt Spannung bestimmt ist. Als wesentliches Isoliermaterial kommt Papier in Betracht, das sorgfältig getrocknet und dann in heißem Zustande mit hochwertigen Harzen getränkt wird. Wie man aus dem Querschnittsbilde sieht, wird das Papierband in zahlreichen Lagen um jeden der drei Leiter aufgewickelt; die Zwischenräume werden mit einem ähnlichen Stoff ausgefüllt, dann folgt noch zum Schutze gegen das Durchschlagen gegen Erde eine weitere Papierumhüllung.

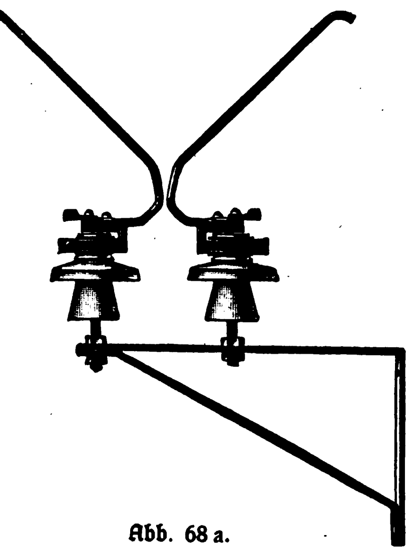


Abb. 68 a.
Hörnerblitzableiter.

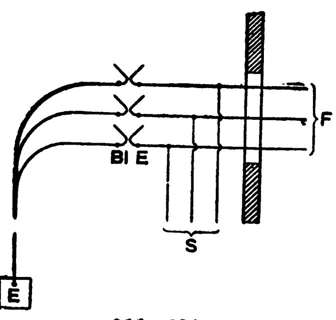


Abb. 68 b.
Schaltung des Hörnerblitzableiters.

Das so vorbereitete Kabel gelangt nunmehr in einen großen Trockenschrank, der auf mäßig erhöhter Temperatur gehalten wird. Nach einiger Zeit wird der hermetisch verschlossene Schrank luftleer gepumpt und so jede Spur von Feuchtigkeit und schädlichen Gasen aus der Kabelumhüllung entfernt. Darauf wird das Kabel, immer noch unter Luftabschluß durch ein Bad aus erwärmten

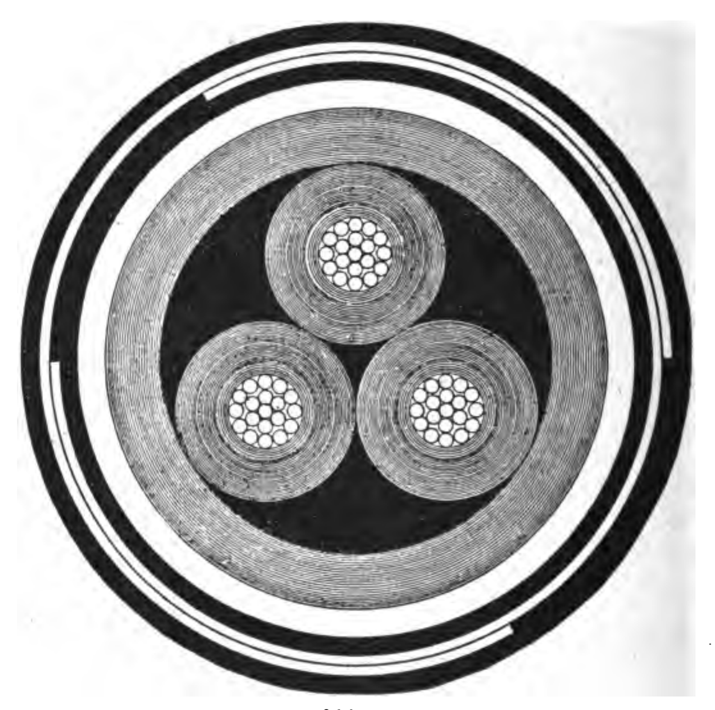


Abb. 69.
Dreiader-Kabel.

Isolierstoffen hindurchgeführt, so daß diese sämtliche Hohlräume vollständig ausfüllen. Nunmehr folgt ein dichter Bleimantel, der das Eindringen von Feuchtigkeit verhindert. Dies ist ganz besonders wichtig. Man hat durch Versuche festgestellt, daß die Durchschlagsfestigkeit bei einem Wassergehalt von nur $^1/_{10}$% auf die Hälfte ihres Wertes sinkt! — Um den Bleimantel vor

mechanischen Beschädigungen zu schützen, ist dieser mit einer doppelten Umhüllung aus spiralförmig gewundenem Stahlblech versehen.

Betrachten wir jetzt einzelne Teile der Hausinstallation und beginnen mit der Besprechung des besonders wichtigen Sicherungssystems. Der Zweck der Sicherungen ist, wie schon der Name sagt, die Leitung vor Beschädigung, durch Überlastung oder durch Kurzschluß zu schützen. Aber nicht allein die Leitung soll geschützt werden, sondern die ganze Umgebung; eine gute Sicherung verhütet die Bildung von Brandstellen und Stichflammen zwischen benachbarten Leiterteilen und schützt das Gebäude wirksam gegen Feuersbrunst. Die Gefahr einer Überlastung der Leiter und als Folge davon starke Erwärmung, ja sogar Erglühen der Drähte kann eintreten, wenn Isolationsfehler vorhanden sind. Mangelhaft isolierte Drähte, unvorschriftsmäßig verlegt, führen bei der heute üblichen Spannung von 220 Volt leicht zum Kurzschluß. Darunter verstehen wir die unmittelbare Berührung von Hin- und Rückleitung ohne zwischengeschalteten Widerstand, wie ihn die Glühlampe, der Motor, der Kochapparat u. dgl. bieten. Der Strom wächst dann plötzlich zu ungeheurer Stärke an, wie ein Blick auf das Ohmsche Gesetz: $I = \frac{E}{W}$ lehrt. Ist W, der Widerstand gleich Null, so wird I unendlich groß, denn eine Zahl übersteigt jeden Wert, wenn man sie durch Null dividiert.

Ein Kurzschluß kann sich nun leicht bilden, wenn die oben erwähnten Verhältnisse vorliegen. Meist wird er eingeleitet durch Spuren von Feuchtigkeit, der Raum braucht deshalb aber noch nicht ausgesprochen feucht zu sein, bei mangelhafter Installation genügt schon schlechte Lüftung, der Aufenthalt vieler Menschen u. dgl. Unablässig arbeitet, getrieben durch die Spannungsdifferenz, die Elektrizität an der feuchten Stelle, erst langsam und unter schwacher Entladung, dann setzt die Elektrolyse ein, es erwärmt sich die gefährdete Stelle, die Leiter berühren sich schließlich, und ein prasselndes Feuerwerk längs der Leitung ist die Folge, wenn nicht die Sicherung einsetzt.

So gestaltet sich das Problem der Sicherung zu einem der wichtigsten der Elektrotechnik und durch die unablässigen Bemühungen der maßgebenden Firmen ist es gelungen, die In-

stallationstechnik mit einem einwandfreien System zu versorgen. Wir werden jetzt sehen, daß gar mancherlei Bedingungen zu erfüllen sind. Das Wesen der Sicherungen beruht darauf, daß in die Leitung ein Drahtstück oder ein Blechstreifen eingeschaltet wird, der bei stärkerer Erwärmung bei Überlastung der Leitung abschmilzt und diese so unterbricht. In den Anfängen der Elektrotechnik nahm man als Material Blei. Dieses Metall hat zwar einen niedrigen Schmelzpunkt, aber ein verhältnismäßig geringes Leitvermögen, so daß ein ziemlich großer Querschnitt genommen werden muß. Infolgedessen ist die Schmelzmasse groß und bei Überlastung vergeht ein längerer Zeitraum, ehe die Leitung unterbrochen wird. Man nimmt deshalb heute ausschließlich für Patronensicherungen Silber, das bei allerdings höherem Schmelzpunkt ein ausgezeichnetes Leitvermögen besitzt und zu sehr dünnen Drähten ausgezogen werden kann.

Die erste brauchbare Form einer vollständigen Sicherungseinrichtung mit Bleischmelzdraht, eines Sicherungselementes, stammt von Edison. Abb. 70 stellt den Schnitt durch eine Edisonsicherung dar. Der Sicherungsstöpsel S hat eine dem Glühlampen sockel nachgebildete Einrichtung und wird auch wie diese in die entsprechende Fassung geschraubt. Der Schmelzdraht s, der die Stelle des Glühfadens vertritt, ist einerseits mit dem Gewinde, andererseits mit dem gegen dieses durch das Porzellangehäuse isolierten Fuß F verbunden. Aus der Zeichnung erkennt man, daß der Strom I seinen Lauf zum Fuße des Sockels nimmt, um von dort durch den Schmelzdraht zum Gewindekorb durch den rechten Anschlußbolzen zur Leitung zurückzugelangen.

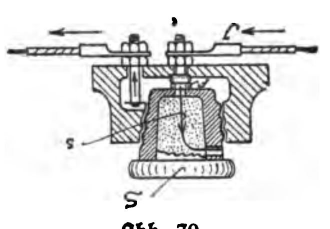


Abb. 70.
Alte Edisonsicherung.

Die Edisonsicherung in dieser einfachen Ausführung hat sich zu einer Zeit einigermaßen bewährt, da die Betriebsspannung etwa 60 Volt nicht überschritt. Mit zunehmender Spannung bot sie indessen nicht mehr die genügende Sicherheit, indem sie nicht hindern konnte, daß bei Kurzschluß wegen der mit der höheren Spannung verbundenen Heftigkeit des Abschmelzens das Gehäuse

zerstört wurde oder eine Stichflamme heraustreten konnte, die leicht entzündliche Stoffe in Brand setzte. Abweichend von der Edisonform schuf zuerst die Firma Siemens u. Halske ein brauchbares Sicherungssystem, das sich für alle Spannungen gut bewährt hat und auch heute noch massenhaft im Gebrauch ist. Die Einrichtung der Siemensschen Sicherung sei kurz beschrieben. Die Patrone aus Porzellan oder einem ähnlichen hartgebrannten Stoff gefertigt, hat einen zylinderförmigen Hohlraum, während durch die Mitte ein Loch hindurchführt. Ein oder mehrere Schmelzdrähte sind in dem zylinderförmigen Raum ausgespannt und mit den metallischen Verschlußscheiben oben und unten verlötet. Der Strom gelangt zu dem in der Mitte befindlichen Bolzen, über den die Patrone geschoben wird, zum Gewindeansatz des Verschlußdeckels. Dieser steht mit der oberen Verschlußscheibe der Patrone in Kontakt, der Strom fließt daher durch die Schmelzdrähte zur unteren Verschlußscheibe und von dort weiter zur Leitung. Ein feiner Draht, der seitlich aus der Patronenwand herausragt, der Kenndraht, der den eigentlichen Schmelzdrähten parallel geschaltet ist, schmilzt unter unbedeutender Wärmeentwicklung gleichzeitig mit diesen ab. Der Kenndraht hat den Zweck, das Abschmelzen der Sicherung anzuzeigen, da man dies sonst äußerlich nicht erkennen kann.

Neben der Siemensschen Sicherung entstanden noch solche anderer Firmen, die mehr oder weniger brauchbar sind; allen haftet der große Mangel an, daß den verschiedenen Systemen die Einheitlichkeit völlig fehlt, so daß das Auswechseln durchgebrannter Patronen an ein bestimmtes Fabrikat gebunden ist, was sowohl für den Händler wie auch für den Konsumenten störend wirkt. Erst im Jahre 1909 wurden vom Verband deutscher Elektrotechniker für den Bau der Sicherungen bestimmte Vorschriften erlassen: die Edisongewindefassung wird beibehalten, jedoch ist die Schraubvorrichtung von der eigentlichen Patrone getrennt. Die Patrone ist aus starkwandigem Isoliermaterial anzufertigen und besitzt einen im Durchmesser abgestuften Fuß, der in eine entsprechende Vertiefung eingreift, so daß es nicht möglich ist, eine Patrone höherer Stromstärke in eine Fassung einzuschrauben, die für geringere Stromstärke bestimmt ist. Außerdem muß jede Patrone mit einer vorne sichtbaren Kennvorrichtung versehen sein, die das Abschmelzen des Drahtes anzeigt,

ohne daß es nötig ist, die Patrone herauszuschrauben. Abb. 71 zeigt die Ausführung der Siemens-Schuckert-Werke. Der mittlere Teil, die Patrone, wird in den Stöpselkopf hineingeschoben, so daß der Gewindekorb mit dem oberen Schlußstück der Patrone elektrischen Schluß hat. Der Fuß der Patrone greift in eine aus Isoliermaterial bestehende Paßschraube hinein, die am unteren Teil eine Verschraubung besitzt, die den Anschluß an die Leitung bewirkt. In Abb. 72 sehen wir eine Patrone im Durchschnitt. Die beiden parallel gespannten dünnen Schmelzdrähte sind abgebrannt und punktiert angedeutet, desgleichen der in der Mitte durchgeführte Kenndraht. Dieser hält bei unversehrtem Zustande der Patrone eine kleine Spiralfeder gespannt, die ein farbiges Plättchen trägt, das in die Vertiefung der Patrone hineingezogen wird. Beim Durchschmelzen reißt auch der Kenndraht und gibt die Spirale mit Plättchen frei, das hinter das Schauglas des Stöpselkopfs fällt. Dieser Zustand ist in der Figur dargestellt. Damit beim Abschmelzen keine Feuerwirkung eintritt, sind die Schmelzdrähte in trockenen Quarzsand eingebettet.





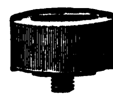


Abb. 71. Zweiteilige Siemenssche Sicherungspatrone mit Fuß.

Das beschriebene System ist unter dem Namen Diazed bekannt: Diametral abgestuft, Zweiteilige Patrone, Edisongewinde. Die Kennvorrichtung zeigt nicht allein das Abschmelzen der Patrone an, es ist auch weiterhin das Kennplättchen farbig gehalten, und zwar hat man sich bei Wahl der Farben an die der Briefmarken gehalten, derartig, daß auch die den Farben entsprechenden Zahlenwerte nach Möglichkeit übereinstimmen, z. B. 10 Ampere-Sicherung rot (10 Pfg.-Marke), 25 Ampere-Sicherung blau (25 Pfennig-Marke) usf.

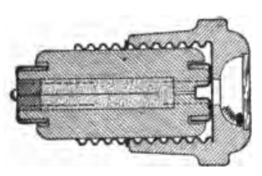


Abb. 72. Abgeschmolzene Sicherung.

Auf Schalttafeln, die stets unter Aufsicht stehen, z. B. in elektrischen Zentralen sind die Abschmelzsicherungen als frei ausgespannte Drähte oder Blechstreifen aus-

geführt, da der hier beim Abschmelzen auftretende Unterbrechungsfunke sofort bemerkt wird und keinen weiteren Schaden verursachen kann. Diese einfache Ausführung erleichtert die Übersicht und ist billiger; auch nimmt man hier nicht Silber, sondern Metall aus einer Spezialllegierung. Derartige Abschmelzstreifen führen den Namen Sicherungslamellen.

Von der Hauptsicherung gelangt der Strom zunächst zum Elektrizitätszähler, dem die Aufgabe zufällt, selbsttätig den Elektrizitätsverbrauch anzuzeigen. Es werden heute fast ausnahmslos die sogenannten Motorzähler angewandt. Im wesentlichen enthalten diese Zähler einen kleinen Elektromotor, der durch einen Teil der elektrischen Energie angetrieben wird, die gemessen werden soll. Wie uns aus früheren Besprechungen bekannt ist, wird diese Energie durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung = Watt gemessen. Der Zähler soll den Verbrauch angeben, d. h. da dieser mit der Zeit zunimmt, das Produkt aus Watt × Zeit. Die Zeit wird auf Stunden bezogen und so kommt man zum Begriff der Wattstunde für den Verbrauch der elektrischen Energie. Diese Einheit ist verhältnismäßig klein, man pflegt deshalb in der Praxis den tausendfachen Betrag zu nehmen die Kilowattstunde, die auch die Grundlage für die Berechnung bildet. So kostet die KW-Stunde 40—50 Pfg., je nach dem Tarif des Elektrizitätswerkes.

Bei Gleichstrom begnügt man sich im allgemeinen damit, nur den Strom und nicht gleichzeitig auch die Spannung auf das Zählwerk einwirken zu lassen. Dies ist deshalb zulässig, weil ja die Netzspannung eine konstante Größe darstellt, z. B. 220 Volt, mit der die Amperestunden einfach zu multiplizieren sind, um den Verbrauch zu erhalten. Dadurch wird der Bau des Zählers einfacher und daher auch billiger. Solche Zähler nennt man Amperestundenzähler. Die Angaben des Zählwerks können sich sowohl auf Amperestunden als auch auf Kilowattstunden beziehen; dies ist meist der Fall, die Zifferblätter sind dann mit entsprechenden Zahlen zu versehen.

Man würde auch bei Wechselstrom das einfache Verfahren des Amperestundenzählers wählen, es verbietet sich dies aber aus Gründen, die in der Natur des Wechselstromes liegen. Wohl hat man versucht, die Schwierigkeit zu überwinden, ohne indes bis jetzt zu einem befriedigenden Resultat gelangt zu sein.

Abb. 73 a und b führt uns einen Amperestundenzähler der

S. S. W. in offener und geschlossener Ansicht vor Augen. Es ist ein Magnetmotorzähler. Der Anker, der von einem Zweigstrom des zu messenden Stromes durchflossen wird, ist im oberen Teil sichtbar; er hat scheibenförmige Gestalt und rotiert zwischen den Polen zweier Stahlmagnete. Durch Schnecken und Zahnradübertragung wirkt die Ankerwelle auf das Zählwerk, das aus



Abb. 73a.
Motorzähler, offen.



Abb. 73b.
Motorzähler, geschlossen.

einer Anzahl Scheiben oder Walzen mit Ziffern besteht. Die Ziffern erscheinen bei der letzteren Ausführung in Schaulöchern; bei der anderen Ausführung bewegt sich meist ein Zeiger über die Skala wie bei der Uhr.

Der in der Abbildung dargestellte Zähler gehört zu den einfachsten und kleinsten Typen für Hausanschlüsse bis zu 10 Ampere höchster Stromentnahme. Für größere Leistungen sind die Stahlmagnete durch Spulen ersetzt, die vom Hauptstrome durchflossen werden; im Nebenschluß zu den Spulen liegt der Ankerstromkreis. Der Anker ist unter allen Umständen möglichst leicht zu halten, um die Reibung nicht unnnötigerweise zu erhöhen; er ist bei den größeren Typen kugelförmig ausgeführt und besitzt Trommelwicklung ohne Eisenkern. In Abb. 74 (auf Tafel I) haben wir uns den Anker in dem Raum zwischen den oben sichtbaren Magnetspulen zu denken. Obwohl als Amperestundenzähler gebaut, gibt das Zählwerk direkt die Kilowattstunden an.

Bei veränderlicher Spannung muß der Verbrauch immer in Watt gemessen werden d. h. der Gang des Werkes muß sowohl durch den Strom wie auch durch die Spannung beeinflußt werden. Dies geschieht in der Weise daß der Hauptstrom die Feldmagnete erregt, während der Anker im Nebenschluß parallel zu den Stellen geschaltet ist, wo die veränderliche Spannung besteht. Abb. 75 zeigt, wie die Schaltung vorzunehmen ist: der Hauptstrom I durchfließt die Wicklungen der Feldspulen F F, während die Ankerwindungen direkt zwischen zwei Stellen der Hauptleitung angeschlossen sind, so daß der Zweigstrom i von der Größe der augenblicklich dort herrschenden Spannung e abhängig ist. Infolgedessen unterliegt der Antrieb des Ankers sowohl den Strom- als auch den Spannungsänderungen. Der Anker soll nicht zu viel Windungen enthalten, der Strom möglichst schwach sein, es ist deshalb der feste Vorschaltwiderstand w vorgelegt. Ein guter Zähler soll überhaupt nur ein Minimum der Energie verbrauchen, da diese ja für die Nutzwirkung verloren geht. Der Verlust tritt neben dem Stromverbrauch im Anker als Spannungsabfall in den Hauptspulen auf, deren Widerstand deshalb möglichst klein zu bemessen ist.

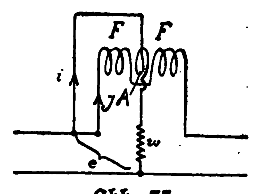


Abb. 75.
Schaltung eines Wattstundenzählers.

Unter der Einwirkung des Feldes und des Ankerstromes würde der Anker eine zu hohe Tourenzahl annehmen und durchlaufen. Dieses verhindert die „Wirbelstrombremse“, eine Aluminiumscheibe, die zwischen den Polen eines Stahlmagneten rotiert und auf der Ankerwelle sitzt. Die Wirkung der Wirbelstrombremse ist uns aus früheren Besprechungen wohl bekannt, sie beruht auf den in der Scheibe erzeugten Wirbelströmen (s. S. 31). Diese treten umso stärker auf, je schneller sich die Scheibe zwischen den Polen bewegt, die Bremswirkung erfolgt daher proportional der Stromentnahme. Bei dem kleinen Amperestundenzähler in Abb. 73 liegt die Wicklung zwischen zwei Aluminiumscheiben, die zusammen mit den Stahlmagneten die Wirbelstrombremse bilden.

Die Gleichstromzähler mit umlaufendem Anker haben alle den nicht zu umgehenden Fehler, daß die auf dem Kommutator aufliegenden Bürsten eine gewisse Reibung hervorrufen und daß

diese sich mit der Zeit vergrößert. Eine Verbesserung hat man dadurch erzielt, daß unter der Einwirkung eines vom Verbrauchsstrome betriebenen Elektromagneten, der Bürstenhalter eine leichte Verschiebung längs der Kommutatorachse erfährt, so daß die Bürsten nicht immer an derselben Stelle aufliegen. Da die Angaben der Zähler aus dem erwähnten Grunde mit der Zeit zu gering ausfallen, hat man versucht, sich von dem schädigenden Einfluß der Bürsten überhaupt frei zu machen und gelangte so zum oszillierenden Zähler, dessen Anker keine vollen Umdrehungen ausführt, vielmehr um eine gewisse Gleichgewichtslage hin und her schwingt.

Ganz frei von Bürsten und Kontakten und den dadurch hervorgerufenen Störungen sind die Wechselstromzähler. Es sind dies auch Motorzähler; wir sahen aber bei Besprechung des Drehstromes, wie es gelingt, den Anker ohne jede direkte Stromzuführung im Drehfelde anzutreiben. Beim Zähler erfolgt der Antrieb auf den Anker prinzipiell in gleicher Weise durch Induktion des umlaufenden Feldes auf den meist scheibenförmig ausgebildeten Anker. Handelt es sich um einfachen (einphasigen) Wechselstrom, so wird das Drehfeld künstlich durch passend eingeschaltete Spulen erzeugt; derartige Zähler werden Induktionszähler genannt.

Den Bedürfnissen der neueren Zeit entsprechend gibt es nun eine ganze Reihe von Sonderausführungen der Zähler. So finden wir den Doppeltarifzähler, der da Anwendung findet, wo zu gewissen Tageszeiten, z. B. in den Abendstunden für einige Zeit eine höhere Taxe in Anwendung kommt, um den Konsum nach Möglichkeit einzuschränken und das Elektrizitätswerk vor Überbelastung zu schützen. Mit dem Zähler ist eine Umschalteuhr verbunden, die selbsttätig in der vorgeschriebenen Zeit das Umschalten von einem Zählwerk auf das andere vornimmt. Zu erwähnen sind hier ferner die Elektrizitätsselbstverkäufer, die nach Einwurf von bestimmten Geldstücken einen entsprechenden Betrag elektrischer Energie für den Konsumenten durchlassen und nach Verlauf der Verbrauchszeit den Strom wieder selbsttätig abschalten. Da der Zähler gleichzeitig das Geld einkassiert, bedeutet diese Einrichtung für die Betriebsleitung eine wesentliche Arbeitsersparnis, zumal da bei den weitverzweigten Netzen der Überlandzentralen eine ständige Kontrole nur unter Aufwand eines größeren Beamtenpersonals möglich wäre.

Vom Zähler führt die Hauptleitung zur Verteilertafel; von hier verzweigt sich die Leitung zu den verschiedenen Verbrauchsstellen. Die Abzweigleitungen sind auf der Verteilertafel im allgemeinen doppelpolig abgesichert, und zwar gelten dafür in Deutschland die Vorschriften für die Errichtung und den Betrieb elektrischer Starkstromanlagen des Verbandes deutscher Elektrotechniker. Danach ist vor jede Querschnittsverringerung eine Schmelzsicherung zu legen, wenn die einzelnen Leitungen für mehr als 6 Ampere Belastung bestimmt sind. Die Installation erfolgt nach dem Schema in Abb. 76. Die Hauptleitung ist zu zwei Klemmen geführt, die auf einer Schalttafel aus Marmor sitzen. Von dort führt die Leitung zu den Sammelschienen L_1 und L_2, die also die Spannung des Leitungsnetzes führen. Die unten abführenden Leitungen sind mit je einem Pol an die Sicherungen S_1 S_2 angeschlossen, und weiterhin mit den Sammelschienen verbunden; es liegt also doppelseitige Sicherung vor. Die vor der Tafel liegende Hauptsicherung müßte bei dem gewählten Beispiel für mindestens 51 Ampere Stromstärke bemessen sein; man wählt den nächst höheren Normaltyp von 60 Ampere.

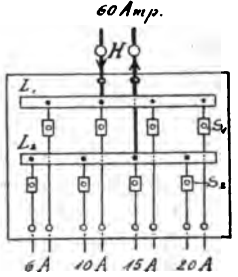


Abb. 76.
Verteilertafel.

Doppelpolige Sicherungen ebenso wie doppelpoligen Ausschalter bieten immer eine größere Sicherheit, sie sind vor allem bei Doppelleitungen erforderlich, die an ein Dreileiternetz mit geerdetem Nulleiter angeschlossen sind, damit unter allen Umständen der Außenleiter abgesichert ist. Nur bei solchen Leitern, die Schalter, Maschinen, Apparate u. dgl. mit der Erde, also etwa mit dem Nullleiter verbinden, die betreffenden Teile also spannungslos halten sollen, sind Sicherungen zu vermeiden, da beim Abschmelzen derselben der Zweck der Erdung verloren gehen würde.

Die Leitungen in Gebäuden müssen natürlich sorgfältig verlegt werden, damit sie unbedingt zuverlässig sind und zu keinerlei Störungen Anlaß geben. Die sogenannte Litzenverlegung ist heute veraltet und wird nur noch in besonderen Fällen angewendet. Meist werden die Drähte in Rohr verlegt, wo auf das Äußere kein besonderer Wert gelegt wird, z. B. in Fabriken,

Werkstätten, Scheunen u. dgl. legt man das sogenannte Bergmannrohr auf die Wand. Es besteht aus einem Rohr, das aus geteerter Pappe hergestellt ist und zum Schutze gegen Beschädigung einen Mantel aus dünnem Blech besitzt. Derartig verlegte Leitungen haben sich vorzüglich bewährt. Bei Neubauten wird die Rohrleitung fix und fertig unter den Verputz verlegt, wobei aber darauf zu achten ist, daß an den Verbindungsstellen, Abzweigungen u. a. keine Feuchtigkeit beim Verputzen in die Rohre gelangen kann. Es ist ferner Vorschrift, die Rohre so zu verlegen, daß die Leitung nachträglich herausgezogen oder eingeschoben werden kann. Zu dem Zwecke sind an den Abzweigstellen, bei starkem Richtungswechsel und in ähnlichen Fällen Anschlußdosen anzubringen. Liegt die Gefahr vor, daß die unter Putz liegende Leitung etwa durch Einschlagen von Bildernägeln beschädigt werden kann, so muß Stahlpanzerrohr genommen werden, bei dem das eigentliche Isolierrohr von einem starken Stahlmantel umschlossen wird. Dieses Rohr ist auch bei allen Deckendurchführungen anzuwenden. In feuchten Kellerräumen, in Bergwerken u. dgl. kommt nur die Kabellegung in Betracht.

Siebentes Kapitel.

Die Verwendung der Elektrizität zur Licht- und Wärmeerzeugung, elektrische Beleuchtung, Heiz- und Kochapparate. Hüttenwesen und verwandte Gebiete.

Mehr als 100 Jahre sind verflossen, als Humphry Davy (1813) den elektrischen Lichtbogen zwischen Kohlestäben entdeckte, und die Forscher der damaligen Zeit waren entzückt über das von dieser Lichtquelle ausgehende blendende Licht. Aus der Werkstatt der Gelehrten fand das Experiment auch bald seinen Weg in weitere Kreise und es war natürlich, daß findige Köpfe daran dachten, diese neue Lichtquelle praktisch zu verwerten. Aber vom Experiment bis zur praktischen Verwertung war noch ein weiter Weg; jahrzehnetelang mußte sich die Menschheit noch gedulden, ehe sie dies neue Licht beglückte. Dies lag nicht sowohl an der Schwierigkeit, geeignete Lampen für Dauerbetrieb zu ersinnen und zu konstruieren, als vielmehr daran, daß man nicht über einen hinreichenden Vorrat elektrischer Kraft verfügte. So

war der Entwicklungsgang des elektrischen Beleuchtungswesens in gleicher Weise beengt und beeinflußt, wie wir es bei der elektrischen Kraftübertragung gesehen haben. Und wie dort mit der Erfindung und weiteren Ausgestaltung der stromliefernden Maschinen das Problem der elektrischen Kraftübertraguug nach und nach in feste und gesicherte Bahnen gelangte, so fand auch das elektrische Bogenlicht seinen Weg vom Experimentiertisch hinaus ins praktische Leben.

Das elektrische Bogenlicht eignet sich nicht zur Beleuchtung kleiner Räume, zum Betrieb von Tischlampen u. dgl., da die ausgestrahlte Lichtmenge zu beträchtlich ist, und man suchte auf anderem Wege zum Ziele zu gelangen. Bekannt war ja schon längst, daß jeder Leiter, der vom Strom durchflossen wird, eine gewisse Wärmemenge entwickelt, die nach dem Jouleschen Gesetz vom Quadrate der Stromstärke und dem Widerstand des Leiters abhängt. Man brachte daher dünne Drähte von hohem Widerstand in den Schließungskreis einer Batterie und konnte den Draht in Glut, bei hinreichender Stromstärke in Weißglut versetzen und zum Schmelzen bringen. Zum Glühen derartiger Metalle waren aber unverhältnismäßig starke Ströme notwendig, denn man benutzte, um Oxydation und Schmelzen zu verhüten, Edelmetalle wie Platin, Iridium u. a. m. Versuche mit schlecht leitenden Substanzen, vor allem mit Kohlestäbchen, ergaben keine befriedigenden Resultate, bis dann im Jahre 1879 Edison dünne Fäden aus Bambusfaser herstellte und unter Luftabschluß verkohlte. Die so erhaltenen Kohlefäden schloß er in eine Glasglocke von birnenförmiger Gestalt ein, evakuierte sorgfältig, bis alle Gase, besonders der Sauerstoff, entfernt waren, darauf schmolz er die Glasbirne zu. Um die Einführungsstellen für die Hin- und Rückleitung dicht zu erhalten, wurden Platindrähte mit dem Glase verschmolzen, wie dies auch heute noch geschieht. Das Glas haftet fest an Platin und löst sich auch beim Erkalten nicht ab, da beide Materialien sich bei Temperaturveränderungen nahezu gleich stark ausdehnen oder zusammenziehen.

Edison versah den Sockel der Lampe mit einem Gewinde und isoliert davon mit einem mittleren Kontaktfuß. In der Leitung befanden sich entsprechende Gegenstücke, in die die Lampe in der auch heute noch üblichen Weise eingeschraubt und so mit dem Netz verbunden wurde. Jahrzehntelang, bis in die neueste Zeit hinein hat sich die Kohlefadenglühlampe erhalten, sie ist

auch heute noch nicht vollständig verschwunden. Aber der ungeheure Aufschwung der Glühlampenbeleuchtung und deren allgemeine Einführung wäre nicht erfolgt, wenn die Glühlampe nicht ganz wesentliche Verbesserungen erfahren hätte. Diese Verbesserungen galten nicht der äußeren Form oder dem eigentlichen Bau der Lampe, denn hieran war gar nichts auszusetzen, ja, das Glühlicht galt als ein so vollkommener Beleuchtungskörper, daß man die hohen Betriebskosten mit in Kauf nahm, wo immer dies die Verhältnisse gelten ließen. Aber die kostbaren Eigenschaften dieser Beleuchtungsart sollten der Allgemeinheit zugute kommen; die Glühlampe durfte nicht Luxus bleiben. Dazu bedurfte es indessen noch ganz erheblicher Reduktion der Betriebskosten, und es erwuchs dem Techniker die Aufgabe, die elektrische Energie im Glühfaden bei weitem besser auszunützen, als dies bis dahin der Fall war. Das Studium der Strahlungsgesetze wies auch den Weg, der einzuschlagen sei, um das gewünschte Ziel zu erreichen oder wenigstens sich ihm zu nähern. Es zeigt sich nämlich, daß jeder Glühkörper außer den sichtbaren Strahlen noch unsichtbare, sogenannte ultraviolette und ultrarote Strahlen aussendet, jene sind die chemisch wirksamen, diese nehmen wir vorwiegend als Wärmestrahlen wahr, und es ist klar, daß eine Lichtquelle um so wirtschaftlicher strahlt, je weniger sie von jenen unsichtbaren Strahlen abgibt. Der Einfluß der ultravioletten Strahlung ist verhältnismäßig gering, ganz außerordentlich aber ist der Anteil der Wärmestrahlen, den alle unsere Strahler abgeben; beträgt er doch bei der Kohlefadenlampe mehr als 90% der Gesamtstrahlung!

Liegt somit das Maximum der Strahlung bei fast allen unseren Beleuchtungskörpern in jenem ultraroten Teil des Spektrums[1]), so lehren uns andererseits die Gesetze der Strahlung, daß mit zunehmender Temperatur dieses Maximum sich zugunsten des sichtbaren Lichtes verschiebt. Das lehrt uns das Experiment, das lehrt uns auch die Erfahrung im täglichen Leben: ein glühender Eisenstab von Rotglut allmählich in Weißglut versetzt, verbreitet mehr und mehr Licht um sich herum. Bei der Bogenlampe liegt das Maximum der Strahlung an der Grenze zwischen sichtbarem und unsichtbarem Licht, entsprechend einer Temperatur von über 4000° C im Lichtbogen; das Sonnenlicht entstammt einem weiß-

---

[1]) Näheres s. P. Eversheim, Band 13 dies. Samml. S. 50ff.

glühenden Körper von etwa 6000^0 C, das Maximum der Strahlung liegt hier ganz im Bereich des sichtbaren Lichtes.

Ein leichtes wäre es nun, die Temperatur des Kohlefadens in der Glühlampe zu steigern, indem die Betriebsspannung und damit die Stromstärke erhöht würde. Aber die helle Weißglut hält der Faden nicht aus, er zerstäubt in kurzer Zeit, und die Teilchen bilden einen schwarzen Belag an der Innenseite der Glasglocke, und bald darauf reißt der Faden. Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts gelang es nun Prof. Nernst, ein Präparat herzustellen, das im Hauptteil Magnesium enthält, aus dem Stäbchen hergestellt werden, die, durch den hindurchgeleiteten Strom in Weißglut versetzt, ein helles Licht ausstrahlen und bei gleicher Helligkeit etwa die Hälfte der bisher geforderten elektrischen Energie verlangten.

Die Nernstlampe, die einen besonderen Zündmechanismus benötigt, ist heute durch die Metalldrahtlampe verdrängt. Die Bestrebungen, einen Körper zu ermitteln, der die zur ergiebigen Lichtstrahlung erforderlichen Eigenschaften besaß, und hohe Temperaturen auszuhalten vermochte, führten zunächst zur Konstruktion der Osmiumlampe, deren Glühfaden aus Osmiummetall bestand. Osmium ist ein sehr sprödes Metall, es läßt sich nicht zu Drähten ausziehen. Man stellte sich deshalb eine Paste her aus Osmiummetall in Pulverform mit organischen Beimengungen und preßte das Gemisch durch eine feine Düse hindurch, so daß ein drahtähnliches Gebilde entstand. Dieser Draht wurde in ähnlicher Weise in die Glasbirne eingeschmolzen wie bei der gewöhnlichen Glühlampe, sodann der Faden langsam durch Stromzufuhr erglüht, so daß die organischen Beimengungen verbrannten. Die Dämpfe sowie Luft und andere Gase wurden dann sorgfältig durch die Vakuumpumpe entfernt. Die so hergestellten Präparate nennt man Metallfäden.

Die Osmiumlampe leistete ungefähr dasselbe wie die Nernstlampe, vor der sie den großen Vorzug des einfachen Aufbaues voraus hatte. Sie bewährte sich indessen in der Praxis keineswegs, denn der künstlich hergestellte Metallfaden, der keine fest zusammenhängende Masse besaß, war äußerst zerbrechlich, so daß schon auf dem Transport massenhaft Brüche eintraten, und selbst geringe Erschütterungen den Zusammenhang des Fadens gefährdeten. Das Fabrikationsverfahren wurde indessen bald verbessert, es fanden sich geeignetere Metalle, so daß die Metall-

fadenlampe sich rasch einbürgerte und sich verhältnismäßig lange auf dem Markte hielt. Der gezogene Draht schwebte aber den Fabrikanten noch immer als Ideal vor Augen, und es gelang zuerst, etwa um 1900, der Firma Siemens, eine Lampe aus gezogenem Tantaldraht herzustellen, der durch ein besonderes Fabrikationsverfahren zu einem äußerst feinen Gespinnst ausgezogen wurde. Dies war nötig, um den erforderlichen Widerstand herbeizuführen, wozu weiter noch die ansehnliche Länge des Drahtes — bis zu 75 cm — beitrug. Dieser lange Draht mußte auf einen sternförmigen Träger aufgehaspelt werden, damit er in dem kleinen Raum der Glasbirne untergebracht werden konnte.

Die Siemensche Tantallampe bewährte sich sehr gut, man findet sie auch heute noch häufig im Betrieb, obwohl die moderne Metalldrahtlampe aller Firmen aus einem Leuchtdraht besteht, der im wesentlichen aus Wolframmetall hergestellt wird und auch wohl Zusätze anderer Metalle enthält (z. B. Osmium). So entstanden die Wolfram-, Osram-, Wotan- usw. Lampen. Alle übertreffen die Osmium- und auch die Tantallampe noch an günstiger Lichtausbeute; Brüche gehören zu den Seltenheiten, lange Lebensdauer ist vorhanden.

Die Metalldrahtlampe besitzt heute eine solche Festigkeit, daß sie auch in denjenigen Fällen, wo starke Erschütterungen auftreten, wie auf Fahrzeugen, oder wo Stöße häufig vorkommen, wie bei Zugpendel, Traglampen u. dgl., die sonst sehr stabile Kohlefadenlampe mehr und mehr verdrängt, so daß diese in absehbarer Zeit wohl überhaupt vom Markte verschwinden wird. Wir werden weiter unten sehen, daß die neue Lampe etwa den vierten Teil derjenigen Energie fordert, die bei gleicher Helligkeit die Kohlefadenlampe benötigt, so daß man sich wundern muß, diese Lampe in Wohnungen überhaupt noch anzutreffen, da ein Ersatz sich in kürzester Zeit bezahlt macht.

Trotz des bisher Erreichten ruhte aber die Technik nicht und sann auf Mittel und Wege, den Betrieb noch billiger zu gestalten. Anlaß dazu bot vor allem der Wunsch, hochkerzige Glühlampen zu konstruieren, die zur Straßenbeleuchtung, zur Erhellung großer Räume, Geschäftslokalen u. dgl. dienen könnten, um mehr und mehr die Bogenlampe zu verdrängen. Dieses Ziel war gewiß verlockend genug, denn, wie wir sehen werden, besteht im Betrieb wie auch im Bau und in den Anschaffungskosten zwischen beiden

Lampenarten ein gewaltiger Unterschied. Andererseits aber hat die Bogenlampe so hervorragende Eigenschaften, daß der Wettkampf nicht leicht ausfallen konnte. Aussicht auf Erfolg konnte überhaupt nur bestehen, wenn die alte Forderung zu erfüllen war, die sich immer wieder von neuem stellt: die Betriebskosten zu vermindern. Dieses Mittel aber liegt hier in noch weiterer Steigerung der Temperatur des lichtgebenden Körpers, von der man aber glaubte, bereits die äußerste Grenze erreicht zu haben. Es zeigte sich nämlich, daß, wie bei der Kohlefadenlampe, auch hier ein Zerstäuben des Fadens eintrat, sowie die Temperatur ein gewisses Maß überschritt. Den beständig ausgeführten Versuchen konnte es dabei nicht verborgen bleiben, daß dieser Übelstand auf das hohe Vakuum in der Glasbirne zurückzuführen war und daß mit zunehmendem Druck die Zerstäubung mehr und mehr unterblieb. Man mußte daher den alten Weg verlassen und die Lampe nach der Evakuierung mit einem Gas füllen, das keine zerstörenden Eigenschaften besaß und eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufwies. Diese Wärmeleitfähigkeit stellte sich den anfänglichen Versuchen hindernd in den Weg, denn ihr Einfluß war so groß, daß die im Innern einsetzende Konvektion, d. h. die Wärmeableitung durch bewegte Gasteilchen einen großen Teil der herangeführten Energie verschlang. Diesem Übelstand begegnete man dadurch, daß der Leuchtdraht zur feinen Spirale aufgewunden wurde, wodurch es möglich wurde, ihn bei großer Länge auf einem kleinen Raum im Innern der Lampenglocke unterzubringen. Indem die einzelnen Windungen die benachbarten bestrahlen, bleibt die Wärme größtenteils dem System erhalten und die Möglichkeit der Wärmeabgabe durch Konvektion ist erheblich verringert, zumal ein bedeutend längerer Weg vorhanden ist.

So entstanden die sogenannten gasgefüllten Halbwattlampen, von denen uns Abb. 77 eine Ansicht gibt; es ist die mit Stickstoff unter etwa ¾ Atmosphären gefüllte Nitralampe der A. E. G. Man erkennt die Leuchtdrahtspirale, die, an geeignetem Halter befestigt, in der Mitte der Kugel ausgespannt ist. Bei kleineren Lampen, deren Glockendurchmesser verhältnismäßig gering ist, nimmt man als Gasfüllung Argon oder ein Gas mit ähnlichen Eigenschaften, d. h. möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit.

So ist die elektrische Glühlampe, die man heute bis zu 4000



Abb. 77. Gasgefüllte Glühlampe.

Kerzenstärken baut, und die sich daher zur Beleuchtung großer Räume, von Straßen und Plätzen vorzüglich eignet, ein gefährlicher Konkurrent der Bogenlampe geworden. Wenn diese auch nicht in bezug auf die Vollkommenheit der Lichtausbeute erreicht wird, so sprechen doch eine Reihe von Vorzügen, die sie der Bogenlampe gegenüber voraus hat, dafür, in vielen Fällen an die Stelle der Bogenlampe zu treten. Zu den Vorzügen gehört vor allem der Fortfall des Auswechselns der Kohlenstäbe, das ruhige Brennen unter Luftabschluß, einfachste Handhabung, weit geringere Anschaffungskosten u. a. m.

Sollte der gefährliche Konkurrent erfolgreich bekämpft werden, so mußte man den Betrieb mit der Bogenlampe vereinfachen, vor allem die Betriebskosten noch weiter reduzieren. Wir werden jetzt sehen, wie dies erreicht wurde.

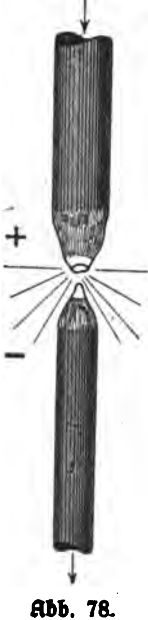


Abb. 78. Lichtbogen.

Das elektrische Bogenlicht beruht auf der Erscheinung, daß zwischen zwei Kohlenstäben, Abb. 78, an die man eine Spannung von etwa 40 Volt anlegt, die Elektrizität auf bogenförmiger Bahn unter starker Lichtentwicklung übertritt. Bei Gleichstrom erhitzt sich dabei die positive Kohle (auch positive Elektrode genannt) auf etwa 4000° C; sie strahlt infolgedessen ein sehr weißes Licht aus. Der Lichteffekt rührt nicht nur von der in Weißglut versetzten Kohle her, sondern auch daher, daß die mitgerissenen Kohleteilchen und etwa noch vorhandene Salze im Bogen ebenfalls in weißglühendem Zustande an der Strahlung teilnehmen. In der positiven Elektrode bildet sich dabei eine trichterförmige Vertiefung aus, der sogenannte Krater, der als Reflektor wirkt und das Licht nach unten strahlt. Die negative Elektrode, die weniger stark abbrennt, und daher dünner gehalten wird, bildet sich zu einem spitzen Kegel aus, ihre Temperatur steigt auf etwa 1700° C.

Dieser Kohlebogen, der auch wohl Voltabogen genannt wird, ist bei der elektrischen Bogenlichtbeleuchtung der lichtspendende Körper. Wie schon eingangs erwähnt, beruht darauf die älteste Art der elektrischen Beleuchtung, und die Versuche, den Voltabogen als ruhig und sicher brennende Lichtquelle zu benutzen, sind ebenso zahlreich wie die Konstruktionsideen. Sie alle hatten mit dem Nachteil zu kämpfen, daß im Gegensatz zur Glühlampe der lichtgebende Körper verbrennt, die Kohlen also nachgeschoben werden müssen und daß es ferner notwendig ist, eine automatisch wirkende Einrichtung anzubringen, die beim Einschalten der Lampe die Kohlestäbe voneinander entfernt, falls sie sich berühren, so daß der Lichtbogen entsteht oder, falls sie sich nicht berühren, auf andere Weise die Zündung zu bewirken.

Die älteren Konstruktionen, die heute längst überholt sind, wollen wir hier übergehen und nur einige gebräuchliche, besonders wichtige Reguliermechanismen besprechen. Diese bestehen im wesentlichen aus dem elektrischen und dem mechanischen Teil. Der elektrische Teil hat die Aufgabe, durch die Wirkung eines Elektromagneten die Zündung herbeizuführen, der mechanische Teil soll für den Nachschub der Kohlestäbe sorgen. Zur Erregung des Zündmagneten kann entweder der Hauptstrom benutzt werden — Hauptschlußlampe — oder man nimmt dazu einen Zweigstrom, der im Nebenschluß zum Lichtbogen liegt — Nebenschlußlampe, oder endlich, man kombiniert beide Schaltungsarten und benutzt ihre Differenzwirkung: Differentiallampe. Die Haupt- oder Nebenschlußschaltung wird bei Lampen benutzt, die einzeln in den Stromkreis geschaltet werden: Parallelschaltung. Da die Spannung für den Kohlebogen bei einer Stromstärke von 10—40 Ampere, je nach Größe der Lampe, zwischen 40 und 50 Volt liegt, so trifft man die Einzelschaltung heute nur noch selten an (z. B. bei den Projektionslampen für Lichtbilder, Kinematographen u. dgl.), da die Netzspannung meist 220 Volt beträgt und der Rest, also etwa $^4/_5$ der Energie durch starke Vorschaltwiderstände vernichtet werden müßte. Nur bei den kleineren Typen, die unter verminderter Luftzufuhr brennen, liegt die Spannung höher, bei etwa 80 Volt; hier verwendet man im Falle einer nicht zu hohen Netzspannung — etwa 110 Volt — der Einfachheit halber Vorschaltwiderstände.

Mit dem Streben nach guter Lichtausbeute geht Hand in Hand der Wunsch, die vorhandene Netzspannung nach Möglichkeit so

auszunutzen, daß Spannungsverluste vermieden werden. Dies kann nur geschehen, wenn eine entsprechende Anzahl von Lampen hintereinander geschaltet wird, wobei sich aber als notwendige Bedingung ergibt, daß nicht etwa die eine Lampe die benachbarte stört. Daher können diese Serienlampen niemals als Haupt- oder Nebenschlußlampen ausgeführt werden. Liegen die Lampen im Hauptschluß, so unterliegen alle den gleichen Stromschwankungen, da in einem geschlossenen Stromkreise die Stromstärke in jedem Querschnitt die nämliche Stärke besitzt. Die Lampen würden sich fortwährend beeinflussen und stören, so daß ein unerträgliches Flimmern und Zucken die Folge wäre, sie würden sämtlich erlöschen, wenn eine einzige ihren Dienst einstellt.

Ganz ähnlich verhält es sich mit der Nebenschlußschaltung; dagegen ist die Differentiallampe frei von dem erwähnten Übelstande, sie beitet daher die wichtigste Schaltung und wir wollen sie etwas näher betrachten. Nach Abb. 79 ist die Wirkungsweise folgende. Der Hauptstrom I_1 von der Elektrizitätsquelle E kommend fließt durch die obere Kohle zur unteren und von da durch die Hauptstromspule H zur Elektrizitätsquelle zurück. Vor dem Einschalten berühren sich beide Kohlen, die obere Kohle ist an dem zweiarmigen Hebel h befestigt, der um r drehbar ist und dessen anderes Ende den Eisenkern F trägt. Dieser ragt zum Teil in die Hauptschlußspule H hinein, zum anderen Teil in die zum Lichtbogen parallel geschaltete Nebenschlußspule N. Die vom Strome I durchflossene Hauptstromspule zieht beim Einschalten der Lampe den Eisenkern F in sich hinein, die Kohlen entfernen sich, so daß der Lichtbogen entsteht. Die Nebenschlußspule ist, solange sich die Kohlen noch berühren, so gut wie stromlos, da die Spannungsdifferenz an den Kohlen bei Berührung fast Null ist. Sowie sich aber der Bogen bildet, wächst dessen Widerstand, somit auch die Spannungsdifferenz zwischen beiden Kohlen und der Strom i. Brennt der Bogen weiter ab, so wird der Hauptstrom I geschwächt, dafür aber steigt die Stärke des Neben-

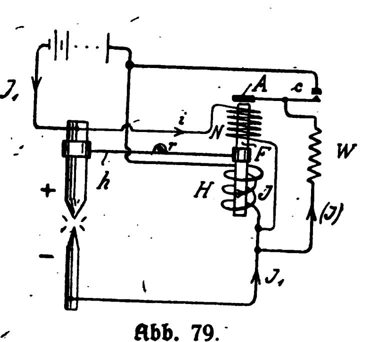


Abb. 79.
Schaltung der Differentiallampe.

schlußstromes i, so daß der Gesamtstrom $I_1 = I + i$ einen nahezu konstanten Wert beibehält, wie auch immer die Bogenlänge und einer der beiden Ströme beschaffen sein mag. Offenbar nimmt der Zweigstrom i seine maximale Stärke an, wenn $I = 0$ wird, d. h. wenn der Bogen erlischt. Nunmehr würden alle im gleichen Stromkreise liegenden Lampen erlöschen oder nur von dem schwachen Nebenschlußstrom i gespeist werden. Dies wird dadurch verhindert, daß jetzt der Anker A, der zu seiner Betätigung den verstärkten Strom benützt, angezogen wird, während die Nebenschlußspule beim Betrieb der Lampe auf A wirkungslos bleibt. Der angezogene Anker schließt bei c einen Schalter, so daß nunmehr der Hauptstrom I über den Widerstand W hinweg zu den übrigen Lampen gelangt; W ist so bemessen, daß er dem normalen Kohlebogenwiderstand entspricht.

Das Schema in Abb. 79 sagt uns nichts über die Art, wie die abgebrannten Kohlen nachgeschoben werden. Dies geschieht unter Mitwirkung des elektrischen Teils durch den mechanischen Teil, der meist aus einem Räderwerk nach Art der in der Abb. 80 dargestellten Skizze besteht. Der Rahmen R ist mit dem Hebel h fest verbunden. Beim Zünden des Bogens wird der Eisenkern F in die Hauptstromspule hineingezogen. Dadurch schwenkt der Rahmen R um den Punkt P, wobei unter Vermittlung eines Gesperrs bei G das Laufrad L an der Drehung teilnimmt. Um dieses Rad ist eine Schnur gewunden, die einerseits den unteren Kohlenhalter, andererseits den oberen trägt und man ersieht leicht, wie durch den oben geschilderten Vorgang beide Kohlen voneinander entfernt werden. Wächst die Länge des Bogens, also dessen Widerstand, so wächst der Strom i in N, d. h. es nähern sich die Kohlen, weil F nach oben gezogen wird, der Rahmen schwenkt nach rechts, wodurch das Flügelrad f frei wird, das vorher an dem nicht mit dem Rahmen verbundenen Stift s arretiert war. Infolge des größeren

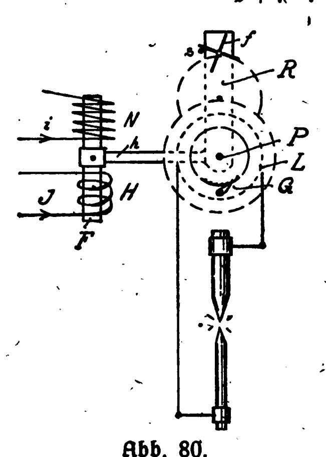


Abb. 80.
Regelwerk der Bogenlampe.

Gewichts der oberen Kohle läuft das Werk ab, bis die Kohlen die normale Entfernung voneinander haben. In diesem Augenblick überwiegt der Einfluß der Hauptspule, der Rahmen schwenkt wieder nach links und arretiert das Laufwerk.

Die Bogenlampen können auch mit Wechselstrom gespeist werden, was namentlich bei den Überlandzentralen notwendig wird. Im allgemeinen gilt das für die Gleichstromlampe Gesagte auch hier. So kann z. B. das Regelwerk ganz ähnlich konstruiert werden, nur ist darauf Bedacht zu nehmen, daß die der magnetischen Wirkung ausgesetzten Eisenteile sorgfältig unterteilt werden müssen, um schädliche Wirbelströme zu vermeiden. Die Wechselstrombogenlampe besitzt aber den Nachteil, daß hier natürlich der weißglühende positive Krater fehlt, wodurch einerseits der günstige Strahlenverlauf nach unten fortfällt und andererseits infolge der niedrigeren Temperatur im Bogen die Lichtausbeute etwas ungünstiger wird. Man ordnet deshalb die Kohlen der Wechselstromlampen nebeneinander an so, daß die Kohlenenden nach unten gerichtet sind und der Lichtbogen direkt nach unten arbeitet (s. a. Abb. 83a).

Soll die Wechselstrombogenlampe, die eine etwas niedrigere Spannung — 30 bis 40 Volt — fordert als die Gleichstromlampe, einzeln an ein Netz von 110 oder 220 Volt angeschlossen werden, so ist es nicht nötig, den Überschuß der Spannung durch Widerstände zu vernichten, sondern man schaltet einen kleinen Transformator ein, der die Netzspannung passend umformt. Auch wählt man, wenn geringe Spannungsreduktion nötig wird, nicht Vorschaltwiderstände, sondern Drosselspulen (s. S. 66). Diese bewirken, wie wir gesehen haben, daß ein Teil der Stromarbeit wattlos wird, ohne den Jouleschen Wärmeverlust herbeizuführen; auch geben sie dem Bogen ein ruhiges Licht.

Was die Lichtausbeute anbelangt, so beläuft sich der spezifische Wattverbrauch, d. h. die pro Kerze verlangte elektrische Energie bei den älteren Lampen auf 0,4 (0,4 W/HK). Dieser an sich nicht ungünstige Wirkungsgrad ist aber heute noch wesentlich verbessert worden und zwar der Hauptsache nach dadurch, daß den Kohlestäben gewisse Salze, Alkalien u. dgl. beigemengt werden. Der Kohlebogen selbst ist verhältnismäßig lichtschwach, führt man aber Salz ein, so leuchtet infolge der starken Verdampfung der Metalldampf hell auf und zeigt dabei ein der Natur der Salze entsprechendes gelb bis rötlich gefärbtes Licht. Es ist dies der gleiche

Effekt, den man beobachtet, wenn man Metallsalze in die nichtleuchtende Flamme des Bunsenbrenners bringt. Es kommt hinzu, daß das Vorhandensein des Metalldampfes die Leitfähigkeit im Bogen wesentlich erhöht, so daß ein längerer Bogen erzielt werden kann. So hat man die Wirtschaftlichkeit auf einen Verbrauch von 0,2—0,3 $\frac{W}{HK}$ gebracht.

War so nach dieser Richtung hin die Bogenlampe der neuesten Halbwattglühlampe noch beträchtlich überlegen, so sprach dennoch ein wesentlicher Umstand zu Ungunsten des Bogens: das häufige Reinigen und das Auswechseln der Kohlestäbe. Dieser Nachteil, begründet in der Natur der Sache, läßt sich freilich nicht beseitigen, aber er läßt sich doch erheblich vermindern. Das schnelle Abbrennen der Kohlen rührt von der Anwesenheit der Luft, d. h. des Sauerstoffs her. Man hat deshalb die Lampen so eingerichtet, daß durch die Schutzglocke ein nahezu luftdichter Abschluß erreicht wurde. So gelang es, die Brennzeit bis zu 100 Stunden und mehr auszudehnen, aber neue Schwierigkeiten stellten sich ein. Indem man der Lampe den Sauerstoff nahm, fehlte das belebende Agens, fehlte der Stoff, der die helle Glut erzeugt und der Vorteil der hohen Lichtausbeute ging verloren. Die S.-S.-W. ersetzen deshalb die gewöhnliche Dochtkohle durch die homogene Effektkohle, die aus einer gleichmäßigen Mischung aus Metallsalz und Kohle besteht. Dadurch wurde ein befriedigendes Resultat erreicht; es mußte allerdings dafür gesorgt werden, daß die bei diesen Effektkohlen besonders reich sich abscheidenden Niederschläge von der Glocke ferngehalten wurden. Abb. 81 veranschaulicht die Art, wie die S.-S. W. diesen Übelstand beheben. Durch die Wände m m werden Kanäle z—z_1 und z_2 gebildet, durch die die Verbrennungsgase hindurchströmen. Der Bogen befindet sich unmittelbar an der Einmündung des inneren Kanals; die stark erwärmte Luft und mit ihr die Metalldämpfe treten dort ein, steigen empor, wobei dann an der kühlen Wand der Kammer z_1 der größte Teil des Dampfes sich niederschlägt und der geringe Rest sich unten am Boden der äußeren Schutzglocke ansammelt, wo die Ablagerung leicht entfernt werden kann; der

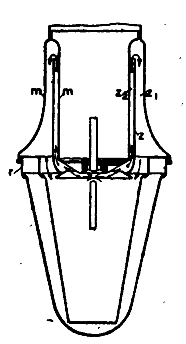


Abb. 81. Beschlagfreie Armatur.

für die Lichtabgabe in Betracht kommende Teil der Glocke bleibt daher völlig klar: **beschlagfreie Armatur.**

Man hat auch bei den offenen Bogenlampen versucht, die Brenndauer zu erhöhen; so entstanden die **Doppelbogenlampen.** Die S. S. W. bringen, wie Abb. 82 erläutert, in jedem Kohlehalter zwei Kohlestäbe an. Beim Einschalten entsteht der Lichtbogen aus dem Kohlepaar, das sich zuerst berührt. Beim Nachregulieren gelangt dann das andere Paar zur Berührung und es bildet sich dort der Lichtbogen. So wechselt das Spiel, etwa alle 20 Minuten von Paar zu Paar, und man erreicht die doppelte Brenndauer, allerdings wird hier keine Kohle gespart, sondern nur die Bedienung vereinfacht.

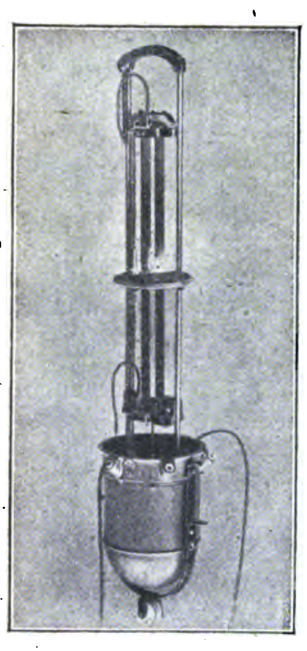


Abb. 82.
Dauerlampe mit Doppelkohlen.

Das Licht der Lampe mit einfacher Glocke ist vornehmlich um die Aufhängestelle verteilt, in weiterem Umkreise fällt die Helligkeit stark ab. Um eine gleichförmigere Lichtverteilung zu erzielen, werden Glocken mit prismatisch ausgebildeten Rippen benutzt. Abb. 83 a veranschaulicht im Schnitt eine Siemenssche Prismenglaslampe, 83 b auf Tafel VII gibt dieselbe in der Ansicht. An a erkennt man, wie die Strahlen infolge der Brechnung auf geneigter Bahn in die Umgebung gelangen und so in größerem Abstand wirksam werden (s. a. die Kurven in Abb. 85 b).

Nach Besprechung der wichtigsten Lampen und Einrichtungen der elektrischen Beleuchtung harrt noch ein wichtiger Teil der Erledigung: die genaue Definition der Lichtstärke, ihre Messung und die Kostenberechnung. Damit wollen wir uns nunmehr beschäftigen und beginnen mit dem Begriff der Einheitskerze. Wie auf manchem anderen Gebiete der Meßtechnik herrschte auch hier in der ersten Zeit große Verwirrung der Begriffe und die aufgestellten Einheitskerzen entbehrten jeder exakten Definition.

Freilich hatte man wohl an die Ausbildung der Einheitskerze bestimmte Forderungen gestellt, man schrieb die Zusammensetzung des Brennstoffes vor, der Docht mußte bestimmte Dimensionen haben u. dgl., aber ein streng einheitliches Maß ließ sich praktisch nicht erreichen. Erst im Jahre 1897 wurde in Deutschland die Hefnerkerze (HK) als Einheit für die Lichtstärke eingeführt, die internationale Verständigung kam dann 1911 durch die Internationale Lichtkommission zustande, wonach die in Frankreich, England, Amerika usf. geltenden Einheitskerzen in feste Beziehung zur Hefnerkerze gebracht wurden:

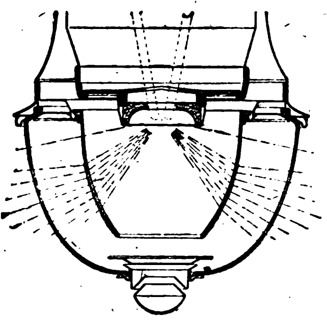


Abb 83 a.
Strahlung durch Prismenglas.

1 HK = 1,11 Standardkerze = Bougie decimal = Amerik Candle
1 HK = 10,75 Carcel.

Die Hefnerlampe der Firma Siemens ist in Abb. 84 dargestellt.

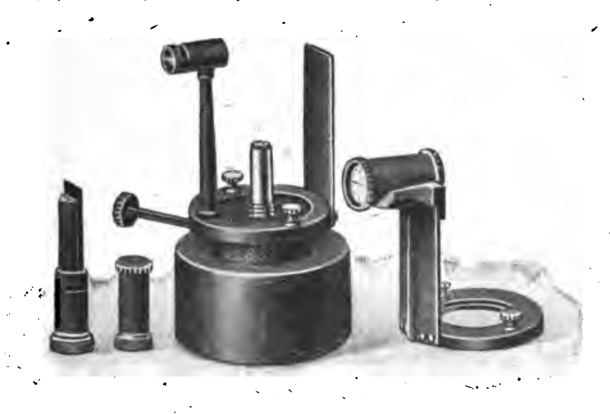


Abb. 84.
Hefnerlampe.

Als Brennstoff wird Amylazetat genommen. Der Docht, 8 mm im Durchmesser, wird so einreguliert, daß die Höhe

der Flamme 40 mm beträgt. Eine Visiervorrichtung, die man auf der Lampe erblickt, gestattet, die richtige Flammenhöhe zu kontrollieren. Dazu kann auch das rechts abgebildete Objektiv dienen, dessen Linse ein Bild der Flamme auf die vorn sichtbare mit einem Merkstrich versehene Mattscheibe wirft; die Spitze der Flamme muß mit dem Strich in gleicher Höhe sein. Der Aufsatz links dient zur Kontrolle des Dochthalters, dessen Höhe durch die mittlere Öffnung betrachtet wird, sowie der Visiervorrichtung, die auf den schneidenförmigen Ansatz hinweisen muß.

Mit dieser Einheitskerze werden nun die zu prüfenden Lampen verglichen. Es geschieht dies nach dem Gesetz: „es verhalten sich die Helligkeiten zweier Lampen einer von beiden gleich hell beleuchteten Fläche gegenüber wie die Quadrate ihrer Abstände von dieser Fläche". Man nennt dieses Meßverfahren Photometrie. Ein bekanntes und sehr einfaches Photometer ist das von Bunsen. Wir denken uns ein Blatt Papier an einer Stelle durch einen Fett- oder Ölfleck durchscheinend gemacht. Bei gewöhnlicher Beleuchtung erkennt man deutlich den Fleck und zwar dunkel, wenn man das Papier bei auffallendem Licht von vorne betrachtet, hell im umgekehrten Falle. Trifft von beiden Seiten gleiche Helligkeit auf, so verschwindet der Kontrast, der Papierschirm nimmt dann einen gleichmäßigen Ton an.

An die Messung von Lichtstärke der Lampen müssen nun aber noch eine Reihe von Voraussetzungen geknüpft werden, denn, entsprechend dem Bau der Lampe und des lichtgebenden Körpers, wird das Strahlungsvermögen nach verschiedenen Richtungen hin verschieden sein. Vor allem werden Lampen nach unten anders strahlen, als seitlich oder nach oben. Bei den Glühlampen begnügte man sich bis vor kurzem damit, die Lichtstärke senkrecht zur Lampenachse zu messen und nahm aus den Messungen von drei um 120° gegeneinander versetzten Richtungen das Mittel. Daß diese Bezeichnung irreführend ist und vielen praktischen Fällen nicht gerecht wird, liegt auf der Hand und es mußte, namentlich mit Rücksicht auf die neuen Lampentypen, Wandel geschaffen werden. Man bezieht deshalb die Lichtstärke heute auf die mittlere räumliche Helligkeit und versteht darunter folgendes.

Wir denken uns von der Bogenlampe in Abb. 85 als Zentrum Strahlen ausgehend, die um einen Winkel von je 10° gegeneinander verlaufen, so daß der erste horizontale Strahl einen

Winkel von 90° gegen den vertikalen bildet. In diesen verschiedenen Richtungen wird nun die Lichtstärke der Lampe gemessen und in einem passenden Maßstab auf dem betreffenden Strahl aufgetragen, etwa pro mm Länge 100 HK. Man erhält dann Punkte gleicher Helligkeit um die Lampe herum, die man durch eine Kurve verbinden kann, um die zwischenliegenden Werte zu erhalten: man sagt, die Kurve ist in ein „Polarkoordinatensystem" eingetragen. Natürlich kann man die Lichtverteilung auch für die übrigen drei Quadranten ermitteln, meist genügt jedoch die Kurve für den unteren und seitlichen Raum. Nimmt man aus den Koordinaten den mittleren Wert, so erhält man die mittlere räumliche Lichtstärke, und zwar in unserem Fall für die untere Halbkugel. Hierfür ist die Bezeichnung untere Hemisphäre üblich im Zusammenhang mit dem Zeichen KH◡.

Die Figuren a und b der Abb. 85 oben stellen

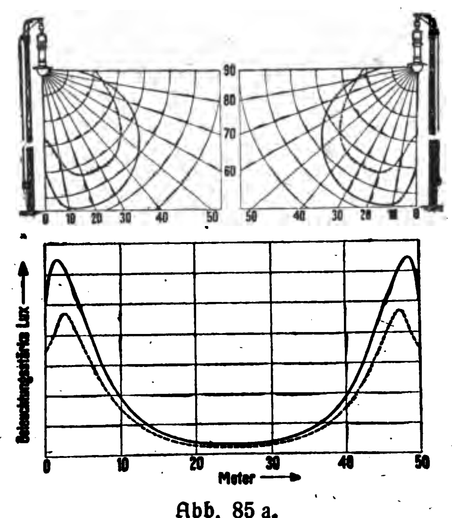


Abb. 85 a.
Lichtverteilung einer Bogenlampe.

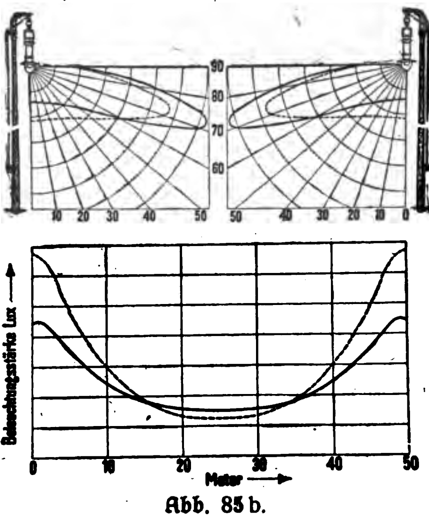


Abb. 85 b.
Lichtverteilung mit Prismenglas.

die Lichtverteilung einer Siemensschen Flammbogenlampe mit nebeneinanderstehenden Kohlen dar, und zwar a die Lichtverteilung ohne Prismenglas, b mit einem solchen. Aus der gestrichelten Kurve erkennt man, wie durch eine Opalglas-Überfangglocke ein nicht unbeträchtlicher Teil des Lichtes absorbiert wird. Die graphische Darstellurg im unteren Teil der Figuren veranschaulicht die sogen. Bodenbeleuchtung; hier dient als Maß das Lux. Man versteht darunter die an dem betreffenden Ort herrschende Helligkeit, die dort etwa ein vollkommen reflektierender weißer Schirm ausstrahlen würde. Diese Helligkeit nimmt mit dem Quadrate der Entfernung r von der Lichtquelle ab, es ist daher 1 Lux $= \frac{1\,\text{HK}}{r^2}$. Ein Vergleich der Kurven lehrt, daß durch Prismenglas eine nicht unbedeutende Verbesserung in der gleichmäßigen Lichtverteilung längs des Bodens erzielt wird.

Der Energieverbrauch der Lampen wird, wie immer bei den elektrischen Vorgängen nach Watt berechnet. Während die alte Kohlefadenlampe in runder Zahl etwa 4 Watt pro HK benötigt, also einen spezifischen Wattverbrauch von 4 hat, verlangt die normale Metalldrahtlampe etwa $1 \frac{\text{W}}{\text{HK}}$, also etwa den vierten Teil davon. Wir sahen, daß die neueste gasgefüllte Lampe nur $\frac{\frac{1}{2}\,\text{W}}{\text{HK}}$ benötigt, und endlich lernten wir im Flammbogenlicht eine Lichtquelle von noch größerer Ökonomie kennen: $0{,}2 \frac{\text{W}}{\text{HK}}$.

Kennt man den Wattverbrauch einer Lampe und die mittlere Kerzenzahl, was bei den neueren Lampen beides am Sockel angegeben ist, so kann man leicht eine kleine Kostenberechnung über den Verbrauch anstellen. Heute sind für Hausbedarf meist 1 Watt-Metallfadenlampen im Gebrauch von etwa 50 HK. Der Strompreis liegt bei etwa 50 Pfg. pro **KWSt**, d. h. pro Stunde würde unsere Lampe 2,5 Pfg. für den Betrieb fordern, eine, mit Rücksicht auf das schöne Licht, das keiner Wartung und Reinigung bedarf, gewiß geringe Summe.

Bei der Besprechung der elektrischen Beleuchtung hatten wir gesehen, daß die unablässigen Bestrebungen nach Verbesserung der Glühlampe darauf fußten, unnötige Wärmestrahlung zu vermindern und an ihre Stelle die lichtspendenden Strahlen

treten zu lassen. Aber selbst bei den Lampen, die das Ziel am vollkommensten erreichten, den ½ Watt-Glühlampen, liegt das Maximum der Emission noch im Gebiet der Wärmestrahlen, so daß die Lichtquelle daran noch außerordentlich reich ist. Da das sichtbare Licht leicht durch Absorption in Wärme umgesetzt wird, so ergibt sich, daß man die elektrische Energie fast vollkommen in Wärmeenergie überführen kann, so daß es scheinen möchte, daß man sich mit Vorteil überall da Wärme verschaffen könnte, wo man deren bedarf. Dies geht jedoch nur in beschränktem Umfange, denn der allgemeinen Einführung der elektrischen Heizung steht der Umstand hindernd im Wege, daß dazu die Elektrizität zu teuer ist, da sie ja doch selbst erst in den meisten Fällen mittelst der Kohle auf sehr verlustreichem Wege erzeugt werden muß.

Zwischen Wärmeenergie und elektrischer Energie besteht wie bei allen Energiearten und wie uns das Joulesche Gesetz lehrt, ein bestimmter fester Zusammenhang, und zwar zeigt das Experiment, daß eine KWSt einer Wärmemenge von 860 kg-Kalorien entspricht. Unter Kalorie oder Wärmeeinheit versteht man diejenige Wärmemenge, die der Masse von 1 kg Wasser zugeführt, deren Temeperatur um 1° C steigert (von 0° auf 1° oder auch mit geringer Abweichung von 15° auf 16°). Es würden also 116 WSt (Wattstunden) nötig sein, um ein Liter Wasser von 0° bis zum Sieden zu erhitzen, oder rund 100 WSt um das Wasser von mittlerer Temperatur auf 100° C zu erwärmen, wenn sich der Vorgang ohne Verluste abspielen würde. Für diese muß man etwa 10% rechnen; sie haben ihren Grund darin, daß durch Wärmeleitung und Strahlung ein Teil der Wärme für die Ausnutzung verloren geht. Nimmt man die KWSt für Heizzwecke zu 10 Pfg. an, so stellt sich das Kochen von 1 l Wasser auf etwas mehr als 1 Pfg. Dies ist, wie man sieht, gewiß nicht teuer und wohl auch billiger als das Kochen auf dem Kohlenfeuer, wenn man dazu erst den Herd anstecken muß. Beim Kohlenfeuer geht der größte Teil des Heizeffektes dem beabsichtigten Zweck verloren; der Herd strahlt mächtig aus, eine Erscheinung, die bei warmer Witterung recht unerwünscht ist und nichts anderes als einen großen Verlust darstellt. So erklärt es sich, daß der Heizwert der Kohle nur höchst unvollkommen ausgenützt wird.

Die Kochapparate enthalten in ihrem unteren Teil einen Hohlraum, in dem der Heizkörper untergebracht ist. Dieser ist

nach Art der elektrischen Widerstände eingerichtet und besteht meist aus einer Nickellegierung. Der Nickeldraht oder das Nickelband wird so angebracht, daß die erzeugte Joulesche Wärme möglichst vollkommen an die innere Wand des Kochtopfs abgegeben wird. Es ist natürlich sorgfältig darauf zu achten, daß stets Flüssigkeit im Gefäß ist, damit keine zu starke Erhitzung und eine Oxydation des Widerstandsdrahtes eintritt. Durch Umhüllung mit Asbestschnur oder Einbetten in passend geformte Steingutträger ist der Hitzdraht nach Möglichkeit vor dem oxydierenden Einfluß der Luft geschützt.

In vielen Fällen ist es erwünscht, den Heizstrom zu regulieren, so z. B. wenn Speisen oder Getränke nur warm zu halten sind. Zu diesem Zwecke besteht der Heizkörper aus mehreren Abteilungen die einzeln oder einander parallel geschaltet werden können, je nachdem der Steckanschluß bewirkt wird.

Auch zur Raumbeheizung hat man die elektrische Energie herangezogen, ohne indes damit ernsthaft mit der Kohlenfeuerung in Wettbewerb zu treten, denn es ist klar, daß der Heizwert der Kohle am besten unmittelbar ausgenutzt wird. Das elektrische Heizen ist daher nur dort angebracht, wo der Strom sehr billig ist oder wo die großen Vorzüge der elektrischen Heizung von ausschlaggebender Bedeutung sind, wie beispielsweise bei elektrischen Bahnen. Billiger Strom läßt sich durch Ausnutzung von Wasserkräften erzeugen; es wäre freilich ein Irrtum, anzunehmen, daß Wasserkräfte unter allen Umständen billiger arbeiten als Dampfmaschinenanlagen. So stellen z. B. große Talsperren derartig kostspielige Unternehmungen dar, daß ein Kraftbetrieb nicht immer mit Dampfanlagen konkurrieren kann, die am Orte reicher Kohlengruben errichtet sind und einen großen Teil des Kohlenabfalls nutzbringend verwerten. Aber ein Vorzug bleibt unerreicht: unter dem Einfluß der Sonne erneuert sich beständig die treibende Kraft, in ununterbrochenem Strom, jahrein jahraus, für unbegrenzte Zeiten eilen die Wassermassen heran, immer wieder von neuem bereit, Arbeit zu leisten, während sich die Kohlenlager beständig erschöpfen.

Über die Kosten der Raumbeheizung können wir uns an Hand einer kleinen Rechnung ein Bild machen. Unter normalen Verhältnissen kann man annehmen, daß etwa 5 Watt erforderlich sind, um 1 cbm Luft um 1° C zu erwärmen. Ein Zimmer von 4 × 5 m Fläche und 4 m Höhe hat 80 cbm Inhalt; soll die Tem-

peratur von 10° auf 20° steigen und auf dieser Temperatur gehalten werden, so sind dazu 80 × 5 × 10 = 4 KW erforderlich. Nehmen wir wieder den Preis von 10 Pfg. pro KWSt an, so würden sich die stündlichen Beheizungskosten auf 40 Pfg. stellen.

Achtes Kapitel.

Die Einrichtung elektrischer Zentralen.

Die elektrischen Kraftwerke kann man in zwei Systeme einteilen, solche die lediglich mit Gleichstrom arbeiten und solche, die Wechselstrom erzeugen, wobei allerdings zu erwähnen ist, daß auch Anlagen bestehen, die, in ihrer Gesamtheit betrachtet, als kombinierte Wechselstrom-Gleichstromsysteme aufgefaßt werden können. Ob die eine oder die andere Stromart zur Verwendung gelangen soll, das richtet sich immer nach den örtlichen Verhältnissen; wir sahen früher schon, welche Faktoren für die Errichtung eines Werkes nach dem einen oder anderen System maßgebend sind (s. a. S. 75ff.).

Die älteren größeren Zentralen waren mit Gleichstrom ausgerüstet, und dies geschieht auch heute noch immer da, wo mäßige Ausdehnung des Verteilungsnetzes die Anwendung dieser Stromart gestattet, denn der Gleichstrom besitzt eine Reihe von Vorzügen, die der Wechselstrom nicht hat. Dahin gehört in erster Linie seine Eigenschaft, elektrolytische Vorgänge zu bewirken, eine Eigenschaft, die nicht allein der Technik und Kleinindustrie zugute kommt, die vielmehr auch zum Bau jener wichtigen Sammler für Elektrizität, der Akkumulatoren, geführt hat, ohne die ein modernes Elektrizitätswerk für Gleichstrom nicht denkbar wäre. Die wichtige Rolle, die diese Sammelzellen spielen, wird sogleich klar, wenn man sich einen Augenblick die Betriebsverhältnisse elektrischer Zentralen vergegenwärtigt. Das Werk muß jederzeit bereit sein, Strom zu liefern, auch dann, wenn wenig Strom gebraucht wird, wie zu gewissen Tages- und Jahreszeiten. Bei rein maschinellem Betrieb müßte wenigstens *eine* Maschine beständig laufen, um auch den geringsten Bedarf zu decken. Bei geringer Belastung aber arbeitet eine Maschine äußerst unwirtschaftlich und das Bestreben der Betriebsleitung ist immer darauf gerichtet, die Anlage voll auszunützen und so zu belasten, wie es der günstigste Wirkungsgrad fordert. Diese Forderung läßt

sich ohne weiteres durch Parallelschalten einer Akkumulatorenbatterie erfüllen, indem nunmehr die Dynamomaschine, falls die Stromabgabe an das Netz gering ist, den Überschuß bis zur Vollbelastung zum Laden der Akkumulatorenbatterie abgeben kann; ja, ist diese geladen, so übernimmt die Batterie die Stromlieferung und die Maschine kann abgestellt werden.

So läßt sich das Gleichstromwerk ohne Zwang den Bedürfnissen der Stromversorgung anpassen, wobei die Betriebsmittel in bestmöglicher Weise ausgenützt werden. Wie steht es nun mit den Wechselstromanlagen? Hier fällt der Vorteil der Stromaufspeicherung fort, denn die hin- und herwogenden Stromimpulse dieser Stromart können keine elektrolytischen Prozesse, auf denen die Wirkung der Akkumulatoren beruht, hervorrufen: was in einer Richtung zustande kommt, wird im nächsten Augenblick durch den entgegengesetzt fließenden Strom vernichtet. Wenn aber auch bis heute noch keine Sammler für Wechselstrom erfunden sind, so ist dieser Umstand für die Wechselstromzentralen doch keineswegs von so großer Bedeutung. Diese Zentralen stellen meist gewaltige Kraftwerke dar, die Elektrizität in großen Mengen erzeugen, um diese dann als Überlandzentralen weit in das Gelände hinein zu versenden. Bei einem derartig weitverzweigten Netz, an das zahlreiche industrielle Anlagen mit Tag- und Nachtbetrieb angeschlossen sind, ist immer Strombedarf vorhanden, und wenn dieser auch natürlich schwankt, so lassen sich immer Maschinen einschalten, die in wirtschaftlicher Ausnützung ihrer Eigenschaften die Stromlieferung besorgen. Freilich Ruhe gibt es hier nicht, Tag und Nacht ist Leben in den eisernen Massen, schwirren die kupfernen Bügel, ständige Wachsamkeit des Menschen fordernd.

Wir betrachten zunächst die Einrichtung der Gleichstromzentralen, wobei wir uns natürlich auf die Besprechung der wichtigsten Teile beschränken müssen. Wie wir im Kap. VI besprochen haben, sind diese Zentralen fast immer mit dem Dreileitersystem ausgerüstet, und zwar herrscht zwischen den Außenleitern eine Spannung von 440 Volt, zwischen dem mittleren Leiter und je einem Außenleiter die Hälfte, also 220 Volt. Um den direkten Anschluß an das Netz zu bewirken, besitzen deshalb die Maschinen eine Armatur mit Spannungsteilung, die von den Maschinenfabriken in verschiedener Weise ausgeführt wird. So rüstet die A. E. G. ihre Maschinen mit einem Zusatz aus, dessen Wirkungsweise wir uns an Abb. 86 klarmachen wollen. Der Anker der

Dynamomaschine G besitzt an zwei gegenüberliegenden Stellen Ableitungen, die mit den Schleifringen s_1 s_2 verbunden sind[1]). Aus unseren früheren Betrachtungen geht hervor, daß bei der Rotation in jeder Ankerhälfte Wechselstrom entsteht, der durch die Wirkung des Kommutators in Gleichstrom umgewandelt wird. In unserem Falle wird nun ein Teil des erzeugten Stromes als Wechselstrom über die Schleifringe und die dort aufliegenden Bürsten hinweg nach außen geführt. Dort gelangt er in die Drosselspule D (s. S. 66), die auf ein Eisengerüst gewickelt ist, wie solche bei den Transformatoren Verwendung finden. Es ist also hohe Selbstinduktion vorhanden, die dem Wechselstrom nahezu gänzlich den Weg versperrt, dagegen sehr geringer elektrischer (Ohmscher) Widerstand, so daß Gleichstrom ohne merkliche Schwächung hindurch gelangt. Nun herrscht an den Enden der Spule ein bestimmtes Spannungsgefälle abwechselnd zwischen + und — 440 Volt, d. h. in der symmetrisch gelegenen Spulenmitte herrscht immer die Spannung Null: hier wird der Mittel- oder Nullleiter angelegt und mit dem Netz verbunden, während die Außenleiter in der gewöhnlichen Weise an die Bürsten resp. Bürstengruppen angelegt werden. Wird nun die eine oder die andere Hälfte des Verteilungsnetzes stärker oder schwächer belastet, so fließt der Ausgleichstrom ungehindert über den Spannungsteiler zur Maschine zurück, wobei er natürlich, entsprechend der Drehung des Ankers im Felde, durch die eine oder andere Spulenhälfte pulsiert, um bei jeder Drehung die seinem Vorzeichen entsprechende Bürste zu erreichen. Im normalen Betrieb ist dafür gesorgt, daß der

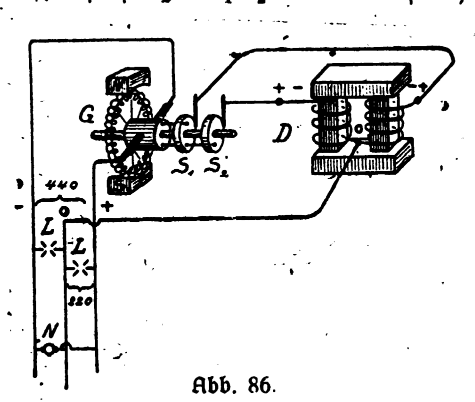


Abb. 86.
Maschine mit Spannungsteiler.

[1]) Bei mehrpoligen Maschinen, die immer in den Zentralen verwandt werden, sind die Ableitungen entsprechend zu vermehren und passend zu verbinden.

Ausgleichstrom im Nullleiter 15% des maximal in den Außenleitern auftretenden Stromes nicht überschreitet.

Einfacher gestaltet sich die Aufgabe, wenn das Netz mit Akkumulatorenstrom versorgt werden soll. Ein Akkumulator hat die Entladungsspannung von etwa 2 Volt, man müßte also eine Batterie von 220 Elementen zusammenstellen, um 440 Volt zu erhalten. Nun kann man offenbar die Batterie in zwei Gruppen von je 110 Zellen teilen, so daß jede Gruppe 220 Volt Spannung besitzt. An die Verbindung der beiden Gruppen legt man den Nullleiter an, der dann zusammen mit den Ableitungen vom positiven und negativen Pol an das Netz angeschlossen wird. In ähnlicher Weise würde auch die Schaltung vorzunehmen sein, wenn die beiden Batteriegruppen durch Maschinen ersetzt würden, eine Schaltung, die aber heute verlassen ist, da die Überwachung zweier Maschinen, die stets unter gleichen Verhältnissen arbeiten müssen, viel schwieriger ist, als die einer Maschine mit Spannungsteiler; außerdem würde der Betrieb umständlicher sein.

Bei starkem Strombedarf genügt eine Maschine nicht, es wird noch eine zweite oder dritte hinzugenommen. Da mehr Strom bei gleichbleibender Spannung gefordert wird, so müssen die Maschinen parallel geschaltet werden. Dies kann aber nicht ohne besondere Vorsichtsmaßregeln geschehen, denn es ist folgendes zu beachten. Zunächst ist natürlich erforderlich, daß stets die gleichen Pole an die für die Stromaufnahme aus den verschiedenen Quellen bestimmten Sammelschienen angelegt werden, denn im anderen Falle würde ein gewaltiger Kurzschluß die Folge sein. Weiter ist noch darauf zu achten, daß die Klemmenspannung der zuzuschaltenden Maschine, die wir nach der Skizze in Abb. 87 mit B bezeichnen wollen, genau der Spannung entspricht, die die im Betriebe befindliche Maschine A besitzt, denn wäre dies

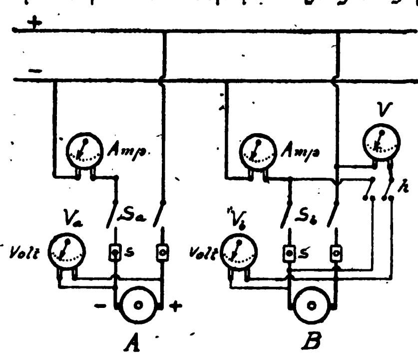


Abb. 87.
Parallelschalten
von Generatoren für Gleichstrom.

nicht der Fall, wäre etwa die Spannung niedriger, so würde die höhere Netz- resp. Maschinenspannung von A einen Strom in die Maschine B hineinschicken, dessen Stärke proportional der Differenz der Spannungen von A gegen B ist. Dies gilt auch im umgekehrten Sinne, wenn etwa die Spannung von B überwiegt. Den Strom, der auf diese Weise zwischen beiden Maschinen zirkuliert, nennt man Ausgleichstrom. Die Skizze erläutert die Art, wie eine richtige Schaltung stets möglich ist. Maschine A sei im Betrieb, B soll hinzugeschaltet werden. Die beiden Voltmeter V_a und V_b geben die Spannungen von A und B an. Maschine B wird mittelst des Nebenschlußregulators so einreguliert, daß ihre Spannung der von A gleichkommt. Bevor der Hauptschalter S_b eingeschaltet wird, wird der Sicherheit halber der kleine Doppelschalter h eingerückt, der den Hauptschalter durch direkte Verbindung auf dem Wege über das Voltmeter V überbrückt. Sind, wie es verlangt wird, beide Maschinenspannungen einander gleich, so herrscht an der Einschaltstelle S_b an beiden Zuleitungen keine Spannungsdifferenz, das Voltmeter V bleibt daher in Ruhe; sind die Pole vertauscht, ein Fall, der durch Umpolarisation der Feldmagnete eintreten kann, und der recht bedenkliche Folgen haben würde, so gibt V die doppelte Spannung an. Die richtige Polarität, die wichtigste Forderung, wird meist auch an dem Voltmeter V_b erkannt, wenn man dazu ein Instrument wählt, dessen Ausschlag von der Stromrichtung abhängt (Drehspulinstrument).

Hat man die Maschine B angeschlossen, so gilt es noch, die Belastung zwischen A und B gleichmäßig zu verteilen. Dies erreicht man leicht dadurch, daß die Spannung von B allmählich erhöht, die von A in gleichem Maße erniedrigt wird. Das gleichmäßige Einregulieren nach oben und unten ist deshalb nötig, damit die Netzspannung unverändert ihren Wert beibehält, denn konstante Netzspannung muß unter allen Umständen gewahrt werden. Im anderen Falle treten Schwankungen auf und es können, falls die Spannung die zulässige Grenze übersteigt, Lampen und Maschinen zerstört werden und auch sonst kann großer Schaden entstehen.

Man übersieht leicht, daß man bei weiterer Spannungsregelung die Belastung der Maschine A vollständig auf B übertragen kann, erstere also stillsetzen kann, ohne daß dies im Netz irgendwie empfunden wird. Ebenso ist leicht einzusehen, daß

eine dritte Maschine hinzugeschaltet werden kann, stets unter Wahrung konstanter Netzspannung.

Es wurde schon hervorgehoben, daß ein Gleichstromwerk meist mit Akkumulatorenbetrieb arbeitet; jetzt müssen wir noch die Wirkungsweise des Akkumulators, dieses unentbehrlichen Hilfsmittels, besprechen, und darauf noch auf einige interessante Einzelheiten der Anlagen eingehen.

Man nennt den Akkumulator auch Sekundärelement, im Gegensatz zum gewöhnlichen galvanischen Element, dem Primärelement, das imstande ist, aus sich selbst heraus, ohne äußere Anregung Strom zu liefern. Die Wirkungsweise des Akkumulators beruht auf der durch die Elektrolyse hervorgerufenen Polarisation der im Elektrolyten befindlichen Metallelektroden. In einem Glasgefäß befinden sich in verdünnter Schwefelsäure zwei Bleiplatten. Eine jede von diesen wird, falls man Strom durch die Zelle hindurchleitet, bis zu einer gewissen Tiefe chemisch verändert, indem der freiwerdende Wasserstoff und Sauerstoff mit den Elektroden eine Verbindung eingeht, und zwar bildet der Sauerstoff mit der mit dem positiven Pol der Elektrizitätsquelle verbundenen Bleiplatte Bleisupperoxyd (PbO_2), während der Wasserstoff an der anderen Platte das dort etwa vorhandene Oxyd zu reinem Blei reduziert. Diese so umgebildeten Platten zeigen nun in der Säure eine Spannungsdifferenz von etwa 2 Volt gegeneinander, die so lange bestehen bleibt, wie die hervorgerufene „Polarisation" anhält. Da aber der Strom beim Entladen die umgekehrte Richtung hat wie der Ladestrom, so wird die Polarisation wieder rückgängig gemacht, bis die Zelle entladen ist.

Wenn wir in der geschilderten Weise das Experiment an zwei Bleiplatten machen, so werden uns die Tatsachen unmittelbar vor Augen geführt, aber wir erkennen auch, daß der Entladestrom von nur kurzer Dauer ist, denn der Sauerstoff vermochte nicht, in das Innere der Platte einzudringen, seine Arbeit konnte er nur an der Oberfläche verrichten, und diese Arbeit ist bald getan; ähnlich liegt es beim Wasserstoff, so daß beim Entladen die dünnen Schichten bald wieder umgesetzt sind. Hier setzt nun die Technik ein. Sie muß von dem Bestreben geleitet sein, dem Gas reichlich Gelegenheit zu geben, die begehrte Verbindung einzugehen und dies geschieht durch zweckmäßige Ausgestaltung der Bleiplatten. Man kann heute zwei Arten von Platten unterscheiden, die Masseplatte und die Großoberflächenplatte. Die Masseplatte wird

in der Weise ausgeführt, daß zunächst ein Bleigitter angefertigt wird. Die Gitterstäbchen sind so geführt, daß sich zahlreiche Labyrinthe bilden und in diese wird nun die sogenannte aktive Masse eingeknetet. Bei der positiven Platte besteht die Masse aus einer Paste, die aus Bleimennige und verdünnter Schwefelsäure angemengt wird. Die Mennige enthält auf drei Teile Blei (Pb) vier Teile Sauerstoff (O): Pb_3O_4, sie stellt also eine bereits fertige hochwertige Sauerstoffverbindung des Bleies dar. Die negative Platte enthält eine Paste aus Bleiglätte in Schwefelsäure. Die so vorbereiteten Platten werden nunmehr „formiert", d. h. eine gewisse Zeit lang beständig geladen und entladen, wodurch sich Bleisuperoxyd und metallisches Blei (als Bleischwamm) in reichlicher Menge bilden.

Bei der Großoberflächenplatte wird die Oberfläche auf mechanischem Wege vergrößert in einer Weise, die gewissen in der Natur vorkommenden Vorgängen nachgebildet ist. Ein jeder kennt die Lamellenbildung unserer Pilze, die im Gegensatz zur glatten Außenhaut die Oberfläche an der unteren Seite außerordentlich vergrößert. Entsprechend führt man die Bleiplatten aus, die aus zahlreichen dünnen Bleiplättchen bestehen, die in einem Bleirahmen untergebracht sind.

Die aktive Masse der negativen Platte der Hagener Akkumulatorenfabrik, wird in Kästchen eingefüllt, die danach durch perforiertes Bleiblech verschlossen werden. Das Formieren der Großoberflächenplatte dauert beträchtlich länger als bei der Masseplatte, indem hier die Produkte ganz neu gebildet werden müssen. Im übrigen besteht auch hier der Formierungsprozeß aus zahlreichen Ladungs- und Entladungsperioden, bis der bestmögliche Wirkungsgrad (etwa 75% Nutzeffekt) erreicht ist. Man prüft dies an der Kapazität; man bezeichnet als solche die Fähigkeit des Akkumulators, eine bestimmte Zeit hindurch Strom von bestimmter Stärke abgeben zu können; sie wird in Amperestunden gemessen.

Durch Vermehren der Platten wird die Kapazität des Akkumulators erhöht. Stets befindet sich zwischen zwei negativen Platten eine positive, so daß ein Akkumulator mindestens 3 Platten besitzt. Die gleichnamigen Platten werden an eine gemeinsame Leiste angelötet, die dann bei den Einzelzellen mit Klemmen versehen, oder bei Batterien mit den benachbarten ungleichnamigen Leisten verlötet werden.

Wir können nunmehr die Frage aufwerfen: welche Plattensorte ist die beste? Es kommen bei der Wahl der Platte die Betriebsverhältnisse in Betracht. Elektrizitätswerke sind meist mit Akkumulatoren mit Großoberflächenplatten ausgerüstet, da diese eine größere Lebensdauer besitzen. Es ist hier zu berücksichtigen, daß die Batterien der Zentralen, namentlich die sogenannten Pufferbatterien starke Stromstöße zu ertragen haben und auch wohl vorübergehend überlastet werden. Hierbei stellt sich leicht Erwärmung und Verziehen der Platten ein, die Platte „arbeitet" in sich. Bei der Masseplatte lockert sich dabei der Inhalt der Zellen, die aktive Masse verliert den festen Zusammenhang mit dem Träger und fällt zu Boden. Dagegen ist deren Kapazität — bei gleichem Gewicht — größer als die der Oberflächenplatte und man wählt sie immer da, wo in gleichmäßigen Betrieben die Sicherheit besteht, daß keine Überlastung eintritt. Ferner wird der größeren Kapazität halber die Masseplatte bei Fahrzeugen angewandt; auf Schiffen, die keinen starken Erschütterungen ausgesetzt sind, bewährt sie sich gut, indessen bei Automobilen ist die Lebensdauer verhältnismäßig gering. Man schützt die aktive Masse durch Zwischenbau perforierter Hartgummiplatten, wie dies die Abb. 88 veranschaulicht.

Ein Lösen der Masse tritt auch bei der Großoberflächenplatte auf. Die losgelösten Teilchen fallen nicht immer glatt zu Boden, sondern setzen sich bisweilen zwischen den Platten fest, die Stelle erwärmt sich dann leicht und ein Verbiegen der Platte bis zur Berührung ist meist die Folge. Um diesem gefährlichen Feind, dem „Kurzschlußbildner" entgegenzutreten, baut die Hagener Akkumulatorenfabrik in ihre Tudorelemente dünne Holzplatten zwischen den Platten ein. Diese bestehen aus besonders präpariertem Holz und erhöhen, da sie mit der Säure vollständig durchdrungen sind, den Widerstand nicht wesentlich. Die Platte der großen Akkumulatoren sind in Holzkästen eingebaut, die mit Blei ausgefüttert sind. Die Platten ruhen mit ihren Fahnen auf starken Glasplatten, die beiderseits in den Kasten hineingestellt werden. Derartige Elemente werden zu Gruppen in die elektrischen Zentralen eingebaut.

Ein guter Akkumulator hat einen Wirkungsgrad von 75% und behält diesen bei guter Behandlung viele Jahre hindurch bei. Wenn auch im Gebrauch die aktive Masse sich nach und nach löst, sich als Satz auf dem Boden ablagert, so bildet sich diese doch

durch das fortwährende Laden und Entladen aufs neue, bis die Reservestoffe verbraucht sind und die Platte ihren Zusammenhang verliert. Eine lange Lebensdauer wird durch gewissenhafte Befolgung der Vorschriften gewährleistet, die für die Leistung des Akkumulators maßgebend sind. Die Kapazität ist eine für jeden Akkumulator geltende Größe, die für eine bestimmte höchst zulässige Lade- und Entladestromstärke vorgeschrieben ist. Hat eine Batterie beispielsweise die Kapazität von 45 Amperestunden bei einer Lade- oder Entladestromstärke von höchstens 15 Ampere, so bedeutet dies, daß auf die Dauer von 3 Stunden dieser maximale Strom entnommen werden kann, eine beliebig geringere Stromstärke bei entsprechender Verlängerung der Zeit stets zulässig ist.



Abb. 88.
Transportabler Akkumulator.

Es war schon kurz bemerkt worden, daß die Entladespannung eines Akkumulators etwa 2 Volt beträgt. In Wirklichkeit ist sie etwas geringer, zumal bei starker Stromentnahme, auch ist sie nicht ganz konstant, vielmehr nimmt sie mit zunehmender Entladung wenn auch wenig, so doch stetig ab. Andererseits ist klar,

daß zur Ladung einer Batterie eine höhere Spannung angelegt werden muß, als deren Gesamtspannung beträgt. Je mehr sich die Ladezeit ihrem Ende nähert, um so höher wächst die Batteriespannung, die im übrigen noch von der Stärke des Ladestromes abhängt, mit dessen Anwachsen sie ebenfalls zunimmt. Wir sehen also, daß die Spannung der Akkumulatorenbatterie außerordentlich schwankend ist, je nach den Verhältnissen, es ist daher nicht möglich, das Verteilungsnetz unmittelbar an die Batterie zu legen, es muß vielmehr dafür gesorgt werden, daß die allmählich abnehmende Spannung der Batterie ausgeglichen wird, und daß ferner die Ladung derselben möglich ist, ohne daß dies an der Netzspannung irgend etwas ändert. Diese Forderung wird erfüllt durch die Angliederung sogenannter Schaltzellen an die eigentliche Batterie, verbunden mit einer Schaltvorrichtung, die, der veränderlichen Spannung entsprechend, Zellen zu- oder abschaltet, je nach den Bedürfnissen des Netzes. Dazu dient der sogen. Zellenschalter, der entweder automatisch oder von Hand aus bedient wird.

Man unterscheidet Einfach- und Doppelzellenschalter. Der Einfachzellenschalter findet Verwendung bei Anlagen, die den Batteriestrom nur dann benutzen, wenn nicht geladen wird, ein verhältnismäßig seltener Fall. Abbildung 89 erläutert die Schaltung. Die Nebenschlußdynamo D arbeitet auf die Sammelschienen S; dort ist sowohl die Batterie (II) als auch das Verteilungsnetz (III) angeschlossen. Durch Betätigung von Hebelschaltern (H) kann man entweder die Maschine allein auf das Netz arbeiten lassen — Schalter von I und III einrücken — oder durch Ausrücken von I und Einrücken von II und III die Batterie allein, oder endlich man kann den Maschinenstrom zur Batterie führen, muß aber dann das Netz bei III abschalten, da sonst Überspannung herrscht. Die Aufgabe des Zellenschalters Z ist nun folgende.

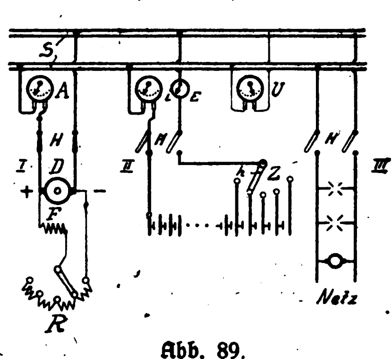


Abb. 89.
Zentrale mit Einfachzellenschalter.

Nehmen wir an, die Batterie versorgt das Netz mit Strom, so gibt uns das Voltmeter V die Höhe der Netzspannung an. Nimmt diese ab, so werden durch Rechtsbewegung des Hebels h Zellen hinzugeschaltet, bis die normale Spannung erreicht ist. Dies ist namentlich dann notwendig, wenn in den Abendstunden in kurzer Zeit viel Strom entnommen wird. Nimmt später der Verbrauch wieder ab, so steigt die Spannung in der Regel etwas an, der Schalthebel wird zurückgedreht.

Beim Laden beobachtet der Wärter den Zustand der Elemente. Da die Schaltzellen, zumal die weiter zurückliegenden, weniger entladen werden, als die Hauptbatterie, so ist auch ihre Ladung vorzeitig beendigt und die geladenen Zellen werden abgeschaltet. Der Ladezustand wird zunächst am Stand der Säure geprüft, deren spezifisches Gewicht während der Ladung zunimmt, und zwar steigt dieses von 1,17 bis etwa 1,21 an. Die fertige Ladung wird aber auch infolge der heftigen Gasbildung wahrgenommen, ist die Ladung beendigt, so findet der Strom in der Zelle keine Arbeit mehr zur Umbildung der Bleiplatten, so daß Wasserzersetzung eintritt und Sauerstoff und Wasserstoff als Gasgemisch entweichen[1]). Die heftig entweichenden Gase reißen Schwefelsäure in feinster Verteilung mit, so daß beim Aufenthalt im Akkumulatorenraum eine Reizung der Schleimhäute eintritt. Es ist daher geboten, derartige Räume mit gutwirkender Lüftung zu versehen.

Betrachten wir das letzte Schaltungsschema genauer und denken uns den Schalthebel des Zellenschalters verschoben, so fällt uns auf, daß beim Übergang von einem Kontakt zum andern der Strom, und zwar der gesamte Netzstrom, unterbrochen wird, denn die Kontaktklötze dürfen nicht wie beim Kurbelwiderstand so angeordnet sein, daß der Hebel den nächsten Kontakt bereits erreicht hat, wenn der vorhergehende noch berührt wird: in diesem Falle würde die zwischenliegende Zelle direkt kurz geschlossen sein und verderben. Andererseits würde sich an der Unterbrecherstelle ein starker Lichtbogen bilden und den Schalter unbrauchbar machen. Man hilft sich in der in Abb. 90 veranschaulichten Weise. Der Gleitkontakt besteht aus zwei Teilen K_1 und K_2, die gegeneinander isoliert sind, aber sonst durch die Widerstandsspirale w

---

[1]) Dieses Gemisch, Knallgas genannt, bildet einen sehr explosiven Körper, daher die Vorschrift: kein offen brennendes Licht im Akkumulatorenraum!

in leitender Verbindung miteinander stehen. Die Wirkungsweise ist folgende: bevor das Segment s_1 verlassen wird, hat K_2 das Segment s_2 berührt, so daß der Hauptstrom in dem Moment, wo der Kontakt zwischen K_1 und S_1 aufgehoben wird, durch die Widerstandsspirale seinen Weg zum Hebel und von dort in normaler Weise weiter nimmt. Da der Schaltvorgang sich in kürzester Zeit vollzieht, so bedeutet der eingeschaltete Widerstand nichts, er ist so zu bemessen, daß die zwischenliegende Zelle nicht über die höchst zulässige Stromabgabe belastet wird.

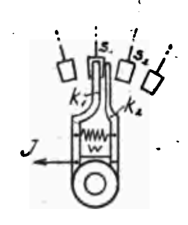


Abb. 90.
Zellenschalter mit Übergangswiderstand.

Der **Doppelzellenschalter** gestattet, den Betrieb ungestört aufrechtzuerhalten, wenn die Batterie geladen wird, während diese Strom an das Netz abgibt. Das Wesentliche ist hier der Lade- und Entladehebel; dieser dient zur Einregulierung der normalen Netzspannung, jener, wie beim Einfachzellenschalter, zum Abschalten der bereits geladenen Schaltzellen. Auch hier wird eine Skizze den Überblick erleichtern und wir betrachten zu dem Zweck Abb. 91. Die Nebenschlußmaschine D kann entweder für sich allein das Netz speisen, es wird dann der Hebelschalter auf die Stellung H_1 gelegt, es kann ferner die Batterie parallel hinzugeschaltet werden — Einrücken des Schalters H_2—, oder endlich, es kann durch Umschalten von H_1 und Einrücken von A die Maschine die Batterie laden, während diese allein das Netz versorgt (s. a. Pufferbatterie). Man erkennt aus der Figur, daß durch Handhabung der Hebel L oder E am Zellenschalter sowohl die Netzspannung konstant gehalten werden kann, als auch die geladenen Zusatzzellen abgeschaltet werden können. Der mit A bezeichnete Schalter ist ein sogen. **Automat**; der Hebel ist als Elektromagnet

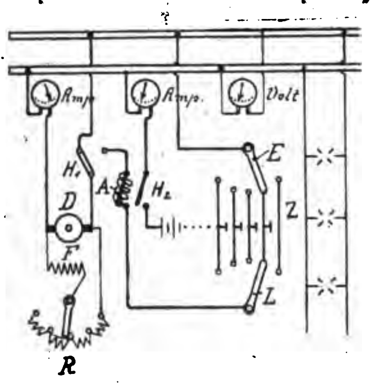


Abb. 91.
Zentrale mit Doppelzellenschalter.

ausgebildet, der durch den Maschinenstrom erregt wird; er verweilt nur solange in der Schaltstellung, als die Erregung anhält, wird das Netz stromlos, so rückt er selbsttätig aus. Dadurch wird verhütet, daß der Batteriestrom rückwärts zur Maschine strömt, falls diese aus irgendeinem Grunde stehen bleibt, ohne daß es beabsichtigt wäre.

Es bleibt uns noch die wichtigste Schaltungsart, nämlich Maschinen und Batteriebetrieb für das Dreileitersystem zu besprechen. In der Schaltskizze der Abb. 92 ist der Fall dargestellt, wo eine Dynamo mit Spannungsteiler vorhanden ist. Bei dem

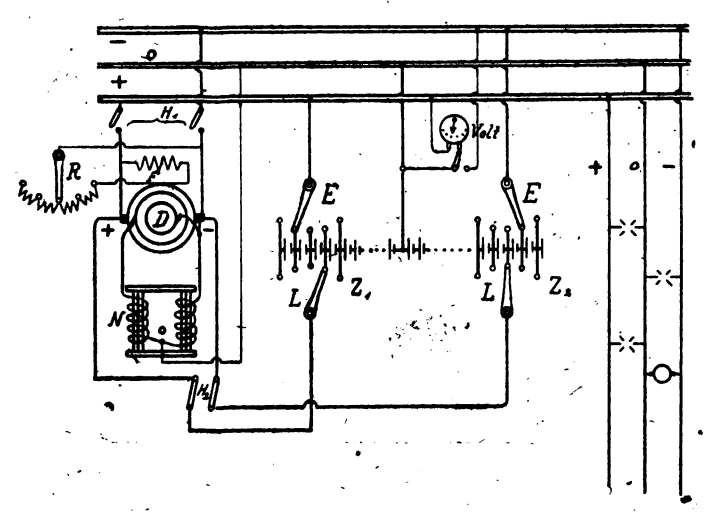


Abb. 92.
Batteriebetrieb mit Dreileitersystem.

Dreileitersystem mit Akkumulatorenbetrieb ist eine in der Mitte unterteilte Batterie nötig, die Mitte wird mit dem Nulleiter verbunden. Jede Batterie besitzt am Schlusse die Schaltzellen Z_1-Z_2, die mit einem doppelten Zellenschalter versehen sind. Wie weiter aus der Stromlaufskizze hervorgeht, kann man durch geeignete Schaltung (H_1 ein-, H_2 ausschalten) die Maschine auf das Netz arbeiten lassen, oder aber man kann gleichzeitig die Batterie laden (Hinzuschalten von H_2), oder diese allein wirken lassen (Abschalten von H_1 und H_2) oder endlich die Maschine lediglich zum Laden benutzen (H_1 aus-, H_2 einschalten). Hier

sind natürlich beide Batteriehälften zu beobachten und dem Ladezustand entsprechend die Zellenschalter zu betätigen.

Abb. 93 gibt die äußere Ansicht eines Doppelzellenschalters der S. S. W. Die Kontaktfedern sind an zwei Rädern mit gezahntem Kranz befestigt; durch Drehen der unten befindlichen Kurbeln wird die Feder um je einen Kontaktfuß verschoben. Man erkennt die zwischen den Radspeichen angeordneten bandförmig ausgebildeten Übergangswiderstände.

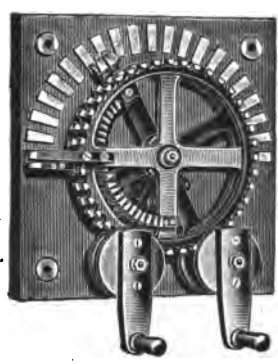
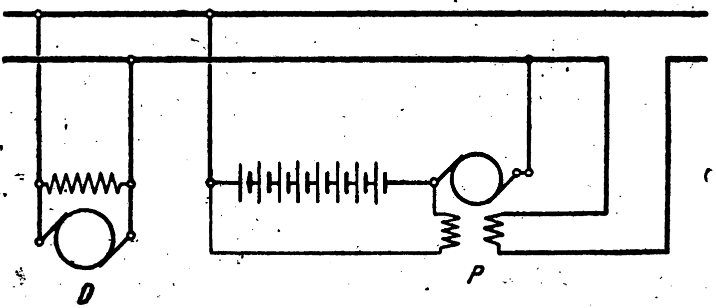


Abb. 93.
Zellenschalterkurbeln.

Der Akkumulatorenbetrieb der Gleichstromwerke bringt noch einen weiteren Vorteil in all den Fällen, wo das Netz starken Belastungsschwankungen unterliegt, die plötzlich und ruckweise auftreten. Dies ist namentlich der Fall beim Anschluß elektrischer Straßenbahnnetze, Walzenzugstraßen u. dgl. So können sich Sprünge in der Stromversorgung einstellen, die sich auf mehrere hundert Ampere belaufen und es ist wohl einleuchtend, daß die Antriebsmaschine der stromliefernden Dynamo einen schweren Stand hat, mit empfindlichen und sicher wirkenden Regulatoren versehen sein muß, um diese Stöße auszugleichen. Der Übelstand wird gänzlich behoben, wenn die Maschine mit der Batterie parallel zum Netz geschaltet wird. Man wählt eine Batterie von hinreichend großer Kapazität, so daß, verbunden mit der Maschinenleistung, auch die höchste Beanspruchung ihre Leistungsfähigkeit nicht übersteigt. So wirkt gewissermaßen die Batterie als Puffer, indem die Stromstöße nicht die Maschine treffen, sondern von der Batterie aufgenommen werden, man nennt sie daher **Pufferbatterie**.

Bei der Stromabgabe hat aber die Batterie erst dann vor der Maschine den Vorrang, wenn bei plötzlich eintretendem Bedarf die Batteriespannung ebenso schnell ansteigt, wie die Stromabgabe dies fordert. Um diesen Zweck zu erreichen, hat man selbstregelnde Zusatzaggregate konstruiert. Es sind dies Maschinen, die neben den eigentlichen Hauptgeneratoren Strom liefern und elektromotorisch angetrieben werden. Die Stromlaufskizze in Abb. 94 veranschaulicht die Wirkungsweise. D ist

die Hauptdynamo, P die Zusatzdynamo, die zusammen mit der Batterie auf das Netz arbeitet. Die Erregung von P ist teils durch die Batterie, teils durch den im Netz fließenden Hauptstrom bewirkt. Nimmt dessen Stärke zu, so steigt die Feldstärke der Zusatzmaschine, also auch ihre Spannung und damit die Gesamtspannung von Batterie und Zusatz, da beide hintereinander



Schaltbild für Pirani-Maschinen. D Dynamo, P Pirani-Maschine.

Abb. 94.
Schaltung der Piranigruppe.

geschaltet sind; es wird somit die Batterie um so stärker zur Entladung herangezogen, als der Hauptstrom anwächst. Sinkt dagegen die Stärke des Netzstromes, so überwiegt der Strom in der Batteriewicklung, die so geschaltet ist, daß die Zusatzspannung sich zur Netzspannung addiert, d. h. die Batterie wird geladen; der auf konstanter Spannung arbeitende Hauptgenerator D bleibt von dem Spiel unberührt.

Abb. 95 auf Tafel VIII führt uns eine Zusatzgruppe der S. S. W. vor Augen, die nach dem Erfinder auch Pirani-Gruppe genannt wird. Links sehen wir den Antriebsmotor, dann folgt die Zusatzdynamo mit doppelseitig angeordnetem Kommutator und besonderer direkt mit ihr verkuppelter Erregermaschine. Diese besitzt die beiden oben erwähnten Feldwicklungen, so daß der von ihr abgegebene Errgerstrom in der besprochenen Weise auf die Wicklung der Piranimaschine einwirkt; diese Trennung ist aus praktischen Gründen zweckmäßig.

Zusatzaggregate werden ferner in den Zentralen benutzt, um durch Zusammenarbeit mit dem Hauptgenerator dessen

Spannung zu erhöhen. Dies ist z. B. erforderlich beim Bahnbetrieb, wenn kein besonderer Bahngenerator vorhanden ist. Wir sahen früher, daß die Gleichstromspannung in den Außenleitern meist 440 Volt beträgt, daß aber die Straßenbahnen mit einer Spannung von 5—600 Volt arbeiten. Diesen Spannungsunterschied gleicht die Zusatzmaschine aus. Es gibt auch Werke, deren Hauptdynamo nur für die Netzspannung berechnet ist. Nun steigt aber die Spannung eines Akkumulators von 2 Volt beim Laden auf etwa 2,8, so daß bei 110 Zellen die Spannung von 220 auf 308 Volt ansteigt. Um die vorhandene Dynamo zum Laden zu benutzen, muß ihre Spannung entsprechend erhöht werden, was die Zusatzdynamo besorgt. Ein solcher Fall kann namentlich dann eintreten, wenn ein Werk zunächst nur für reinen Maschinenbetrieb eingerichtet war, der kombinierte Betrieb mit Akkumulatoren aber erst nachträglich hinzugenommen wurde.

Der Name Zentrale weist darauf hin, daß das Elektrizitätswerk im Zentrum des Versorgungsgebiets liegen soll. Dies ist aber nicht immer möglich, ja meist ist für derartig große Anlagen im Innern der Stadt kein Platz vorhanden; auch fordern die Verkehrsverhältnisse nicht selten den Anbau in einem nach außen zu gelegenen Viertel, so daß die Strombelieferung einseitig erfolgen muß. In kleinen Städten ist dies nicht von Belang, da die Entfernungen nicht so beträchtlich sind, um bei 440 Volt einen störenden Spannungsabfall zu bewirken. Bei Städten von einiger Ausdehnung hingegen wirkt die Dezentralisierung störend und man muß Abhilfe schaffen. Dies geschieht zunächst durch Anlage von Unterstationen, die, an geeigneter Stelle gelegen, keinen größeren Raum beanspruchen und weder durch störendes Geräusch noch durch Rauch die Umgebung belästigen. In der Unterstation sind große Akkumulatorenbatterien, eventuell auch Zusatzaggregate aufgestellt, die direkt oder indirekt von der Zentrale aus gespeist werden. Zur Regelung und Kontrolle dienen Fernschalter und Instrumente, die über den Zustand der Unterstation ein zuverlässiges Bild gewähren, so daß zur lokalen Bedienung eine geringe Zahl von Beamten ausreicht.

Ein weiteres Mittel, fernliegende Punkte vor übermäßigem Spannungsabfall zu bewahren, bieten die Speisekabel. Es sind dies Kabel, die vom Elektrizitätswerk direkt zu gewissen Verteilungspunkten des Versorgungsgebietes verlegt sind und dort Strom unter der normalen Spannung abgeben. Eine wichtige

Rolle spielt das Speisekabel bei den elektrischen Bahnen. Hier wird es in der Regel an den Masten verlegt oder dem Fahrdamm im Erdreich entlang geführt. Auf diese Weise ist es auch möglich, zwischenliegende Stellen auszuschalten, wenn etwa Defekte eintreten, ohne daß den angrenzenden Strecken der Strom entzogen wird. —

Es wurde schon wiederholt darauf hingewiesen, daß weit ausgedehnte Netze nicht mit Gleichstrom betrieben werden können, sondern stets mit Wechselstrom arbeiten. Dies ist zumal bei den Überlandzentralen der Fall, mit deren wichtigsten Einzelheiten wir uns nunmehr bekannt machen müssen. Da der Akkumulatorenbetrieb bei dieser Stromart fortfällt, so ist es erforderlich, daß zur Deckung des Strombedarfs wenigstens eine Maschine im Betrieb ist, daß aber, wenn dies notwendig wird, noch eine oder mehrere Maschinen parallel hinzugeschaltet werden müssen. Was wir bei der Parallelschaltung der Gleichstrommaschinen hinsichtlich der Spannung und des Ausgleichsstromes gesagt haben, gilt auch hier. Es tritt aber eine gewisse Schwierigkeit hinzu, deren Überwindung anfangs noch mancherlei Versuche und eingehendes Studium forderte.

Ohne ein tieferes Eingehen auf das Wesen des Wechselstromes und die Verhältnisse bei der Stromerzeugung ist es nicht möglich, die sich abspielenden Vorgänge erschöpfend zu behandeln, wir müssen uns daher auf das beschränken, was nach dem, was wir bisher vom Wechselstrom kennen gelernt haben, ohne weiteres klar zur Anschauung gebracht werden kann und begnügen uns im übrigen damit, auf besonders wichtige Einzelheiten noch hinzuweisen.

Es sei nach Abb. 96 der Wechselstromgenerator D_1 in Tätigkeit und liefere Strom an das Netz. Der Generator D_2 sei in Gang versetzt und soll parallel hinzugeschaltet werden. Damit dies möglich sei, sind mehrere Bedingungen zu erfüllen, nämlich gleiche Klemmenspannung und gleiche Periodenzahl bei möglichst gleicher Kurvenform des Wechselstroms (s. d. Erklärungen auf S. 12ff.) und synchronem Lauf. Ob die erste Bedingung erfüllt ist, wird an den Voltmetern V_1 und V_2 festgestellt, zur Feststellung der gleichen Periodenzahl dient folgende Einrichtung. Parallel zum Schalthebel H_2 liegt das Voltmeter V_3 und eine Glühlampe G, sowie die Kurzschlußleitung l. Das Voltmeter wird nur dann regelrechte Angaben machen, wenn der gewünschte

Zweck erreicht ist. Denn, nehmen wir an, es sei die gleiche Periodenzahl, oder was gleichbedeutend ist, die gleiche Polzahl noch nicht erreicht, es sei beispielsweise nach einer gewissen Zeit Maschine D_1 in der Periodenzahl der Maschine D_2 um eine voraus, so wird sich dies am Voltmeter V_3 durch periodische Bewegung des Zeigers zwischen 0 und einem maximalen Wert zu erkennen geben. Dies erläutert die Kurvenfigur in Abb. 97, die der besseren Übersicht halber das Spiel auf einige Perioden zusammengedrängt veranschaulicht; in Wahrheit liegen die Zeitpunkte viel weiter auseinander. Es stellen die Kurvenzüge a und b den Verlauf der Spannungen beider Maschinen dar. Zur Zeit t_1 ist ein Unterschied in der Phase noch nicht bemerkbar, das Voltmeter zeigt die Summe der Spannungen beider Maschinen an (dargestellt durch die Summe der Ordinaten in den betreffenden Zeitpunkten) $E_1 + E_2$. Nach einer Reihe von Perioden, zur Zeit t_2 sind die Spannungen in der Phase soweit gegeneinander verschoben, daß sie sich gerade aufheben, während zur Zeit t_3 wieder nahezu die Summe der Spannungen erreicht ist. In Wirklichkeit kommen auf mehrere hundert Perioden der einen Maschine die um eins vermehrte oder verminderte Zahl der anderen; je weiter die Zeitpunkte der Koinzidenz oder der Diskordanz auseinander rücken, um so mehr nähern sich die Maschinen dem synchronen Gang. Die geschilderte Erscheinung nennt man Schwebung, außer am Voltmeter wird diese auch an der Glühlampe G erkannt, die abwechselnd hell und dunkel brennt, je nach dem Phasenzustand

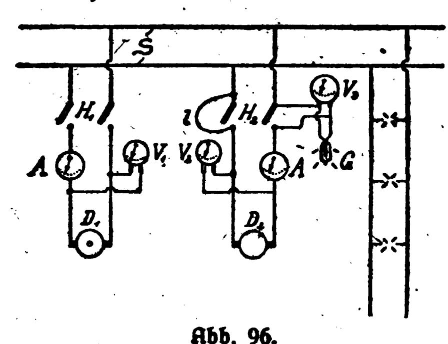


Abb. 96.
Parallelschaltung von Wechselstromgeneratoren.

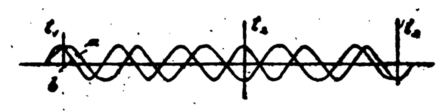


Abb. 97.
Zusammenwirken zweier Wechselströme ungleicher Periode.

der zusammenarbeitenden Spannungen und der durch sie hervorgerufenen Ströme; man nennt diese Lampe **Phasenlampe**.

Die Tourenzahl der Maschine D_2 ist also solange zu regulieren, bis die Schwebungen verschwunden sind, die Maschinen im Tritt arbeiten, sodann kann der Hebel H_2 in die Hauptstellung übergeführt werden.

Soll nun die Belastung auf beide Maschinen gleichmäßig verteilt werden, so kann dies nicht wie bei den Gleichstrommaschinen einfach dadurch geschehen, daß unter Wahrung der normalen Netzspannung die Spannung von D_1 verringert, die von D_2 entsprechend erhöht wird. Wir haben hier nämlich den praktischen Fall eines Synchronmotors (s. a. S. 54). Darunter verstehen wir folgendes. Wir sahen bei der Besprechung des Gleichstrommotors, daß dieser im Grunde nichts anderes ist, als eine Dynamomaschine, die als Motor wirkt, wenn man sie mit Strom versorgt. Wir sahen weiter, daß dieses Umkehrprinzip nicht ohne weiteres auch bei Wechselstrommaschinen gilt, sondern nur in dem einen Falle, daß vorher die als Motor gebrauchte Maschine auf eine Tourenzahl gebracht wird, die der Periode des Generators entspricht, so daß die Momente der Polwechsel zusammenfallen. Dies ist der eigentliche Begriff des Synchronismus; es genügt also zum synchronen Lauf nicht, daß die Polwechselzahl übereinstimmt, sondern die **Gleichzeitigkeit** der Wechsel ist von Wichtigkeit.

Zeigt das Phasenvoltmeter die normale Spannung an, so herrscht Synchronismus und nun bleibt dieser Zustand auch selbsttätig erhalten. Sucht nämlich die Maschine D_2 vorzueilen, so erzeugt sie Überspannung und schickt Strom zur Maschine D_1 zurück, diese als Motor antreibend oder motorisch unterstützend. D_1 läuft aber deshalb nicht schneller, sondern erhält, falls etwa der Antrieb durch eine Dampfmaschine erfolgt, im gleichen Augenblick durch das Spiel des Regulators weniger Dampf. Sucht D_2 zurückzubleiben, so wird diese Maschine von D_1 aus mit Strom versehen und auf der dem Synchronismus entsprechenden Tourenzahl erhalten. Da also die im Betrieb befindliche Maschine D_1 durch den Regulator der Antriebsmaschine auf gleichbleibender Tourenzahl gehalten wird, so bleibt auch die Tourenzahl der anderen Maschine konstant, auch wenn die Felderregung erhöht wird, wird sie keinen Strom an das Netz abgeben.

Um daher die Belastung auf beide Maschinen gleichmäßig

zu verteilen oder von der einen auf die andere zu übertragen, ist es beim Wechselstrombetrieb erforderlich, nicht nur die Felderregung der beiden Maschinen zu regulieren, sondern gleichzeitig auch die Leistung der Antriebsmaschinen entsprechend zu ändern. So ist z. B. der Regulator der Dampfmaschine so einzurichten, daß eine Mehr- oder Minderleistung von Hand aus ohne Schwierigkeit eingestellt werden kann.

Eine Erscheinung, die sich beim Parallelbetrieb der Wechselstromgeneratoren störend bemerkbar macht, ist das sogen. Pendeln. Dies rührt davon her, daß periodisch in kurzen Zeiträumen die Polgeschwindigkeit der einen Maschine gegen die der anderen zurückbleibt oder ihr vorauseilt, während an sich die Polwechselzahl beider Maschinen gleich ist. Hauptsächlich wird diese Erscheinung durch den ungleichförmigen Antrieb der Kolbenmaschinen herbeigeführt. Bei der Kolbendampfmaschine erfolgt bekanntlich der Antrieb bei gewissen Kurbelstellungen, so daß in jenen Momenten ein beschleunigter Antrieb auf die Massen erfolgt. Auch bei bester Anordnung der Massen in den Schwungkörpern ist ein völliger Ausgleich nicht zu erzielen. So kommt es, daß der Wechselstrom einer Maschine während einer Umdrehung abwechselnd gegen den der anderen Maschine zurückbleibt oder vorauseilt, es kommt dadurch ein Ausgleichstrom von beständig schwankender Stärke zustande, der zwischen beiden Maschinen hin- und herspielt und den Betriebsstrom überlagert. Es ist klar, daß das Pendeln stärker auftritt, wenn zwei Maschinen unter entgegengesetzten Antriebsverhältnissen zusammenarbeiten, wenn also etwa bei zwei einzylindrischen Dampfmaschinen gleicher Bauart die Kurbel der einen in der Hauptantriebsstellung sich befindet, während die der anderen gerade den Totpunkt überschreitet. Daraus folgt aber auch, daß man das Übel beseitigen kann, wenn man dafür sorgt, daß die Kurbeln der Antriebsmaschinen stets die gleiche Lage haben; der ungleichförmige Antrieb bleibt zwar bestehen, aber er erfolgt in beiden Fällen zur gleichen Zeit und wird daher nicht bemerkt. Der Ungleichförmigkeitsgrad der Antriebsmaschinen ist ferner ohne Einfluß bei Anlagen, wo Riemenübertragung besteht, indem die Ungleichförmigkeit in dem elastischen Band abklingt.

Da das Pendeln sehr störend wirkt und unter Umständen das Außertrittfallen der Maschinen zur Folge haben kann, wenn nämlich die Pole des Polrades sich aus dem Bereich der

zugehörigen Ankerspulen entfernt haben, so hat man dort, wo dies nötig ist, Gegenmaßregeln getroffen. Ein wirksames Mittel beruht darauf, daß man den Kopf eines jeden Magnetpols mit einem starken Kupferband umgibt, so daß sich diese Kupfermassen unmittelbar im magnetischen Kraftfeld befinden. Ist Synchronismus vorhanden, so können keine Ströme in den Kupferbändern durch Induktion entstehen, denn in diesem Falle laufen die Pole des Ankers, elektrisch betrachtet, ebenso schnell um, wie die Pole des Polrades infolge des mechanischen Antriebs. Daher ändert sich die Zahl der die Kupferbügel durchsetzenden Kraftlinien nicht, Wirbelströme treten nicht auf. Dies wird sofort anders, wenn das Polrad keine gleichförmige Umfangsgeschwindigkeit entwickelt; in diesem Falle werden die Kupferbügel von Kraftlinien geschnitten und es entstehen Wirbelströme. Dazu ist aber ein erheblicher Arbeitsaufwand nötig, der eine starke Dämpfwirkung auf das Pendeln ausübt; die Bewicklung der Pole führt den Namen Dämpferwicklung.

Bei Anlagen mit gleichförmigem Antrieb, wie bei den Wasserkrafträdern, fallen die erwähnten Schwierigkeiten fort. Aus diesem Grunde wendet man auch beim Dampfbetrieb überall da, wo dies möglich ist und wo es sich um große Einheiten handelt, die Dampfturbine an, von der auf S. 46ff. bereits die Rede war und deren sonstige Vorzüge dort hervorgehoben wurden. Die Technik des Turbogeneratorenbaues hat in den letzten Jahren gewaltige Fortschritte gemacht und unsere großen Firmen haben deren Fabrikation in großem Stile aufgenommen. Man baut heute Anlagen bis zu 25000 Pferdestärken, eine ungeheure Leistung, die in kleinem Raum entwickelt wird. Freilich ist dies nur bei hoher Tourenzahl möglich, und es bedurfte vieler Versuche und geistreicher Gedanken, ehe es gelang, den rotierenden Teilen den gewaltigen Fliehkräften gegenüber den genügenden Halt zu geben. Beträgt doch die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors der Dynamo bis zu 100 m/sec! Da gilt es, die Wicklung sorgfältig einzubauen und Sorge zu tragen, daß sie völlig fest und unbeweglich in den Nuten sitzt.

Die Reibungsarbeit in den Lagern der Turbine ist enorm, da wegen der gewaltigen Kräfte, die von der Dampfmaschine auf den Rotor übertragen werden, Wellen mit erheblichem Durchmesser genommen werden müssen. Bei den großen Einheiten kommt auf diese Arbeit die Leistung von mehreren hundert

Pferdestärken, eine Arbeit, die natürlich ihren Ausgleich finden muß und als Wärme auftritt. Es muß daher gute Kühlung vorgesehen werden, was zum Teil durch einen kräftigen Luftstrom bewirkt, zum Teil aber auch durch Zirkulationsschmierung erreicht wird. Diese besteht darin, daß ein Ölstrom beständig die Lager umspült, wieder abgesaugt und gekühlt wird, um dann den Prozeß von neuem zu wiederholen; auf diese Weise gelangt etwa 1 cbm gekühltes Öl pro Minute an die Lager!

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß in Gleichstromzentralen unter Umständen der Antrieb der Generatoren auf elektrischem Wege geschieht, nämlich dann, wenn der Anschluß an eine Überlandzentrale unter vorteilhaften Stromlieferungsbedingungen möglich ist und das Netz mit Gleichstrom versorgt werden soll. Die hierzu erforderlichen Maschinen nennt man Umformer. Sie bestehen prinzipiell aus einem Wechselstrommotor, der mit der Gleichstromdynamo verkuppelt ist und diese antreibt. Bei den Zweiankerumformern wird der Motor mit der Dynamo auf gemeinsamer Grundplatte montiert und mit dieser durch elastische Kuppelung direkt verbunden. Eine andere Bauart weist der Einankerumformer auf, der in neuerer Zeit vielfach verwendet wird. Dieser Umformer ist zunächst als Dynamomaschine für Gleichstrom gebaut, der Anker besitzt aber an drei symmetrisch zu einander gelegenen Stellen Abzapfungen, die mit drei Schleifringen verbunden sind. Der Umformer wird durch einen kleinen Drehstrommotor auf die Tourenzahl gebracht, die dem synchronen Lauf entspricht, darauf wird an den Schleifringen der Betriebs-Drehstrom zugeführt und die Maschine läuft als Synchronmotor mit Kraft weiter. Natürlich kann man in ähnlicher Weise mit einphasigem Wechselstrom verfahren. Der Gleichstrom wird in der gewöhnlichen Weise auf der Kommutatorseite abgenommen. Die Ansicht eines Einankerumformeers der S. S. W. von 880 KW Gleichstromleistung veranschaulicht Abb. 98 auf Tafel VIII; neben der eigentlichen Maschine erkennt man links den Anwurfsmotor.

Der von den Maschinen erzeugte Strom nimmt seinen Weg über die Schaltbühne hinweg und gelangt darauf in die einzelnen Leitungen, um dem Orte seiner Verwendung zugeführt zu werden. Die Schaltbühne besitzt alle erforderlichen Apparate und Instrumente, die eine sichere Regelung und Überwachung des Betriebs ermöglichen. Den neuen Vorschriften entsprechend gewährt

sie nicht allein einen schönen, ja ästhetisch schönen Anblick, sie ist auch so eingerichtet, daß namentlich bei Hochspannungsanlagen bei unbeabsichtigter Berührung eine Gefahr fast vollständig ausgeschlossen ist. Freilich stellt sie in ihrer Gesamtheit ein recht kompliziertes Gebilde dar, in dem sich Glied zu Glied in wundervoller Symmetrie anordnet. Aber ihre Aufgabe kann auch nicht einfach sein, denn hier gilt es, jene urwüchsigen Kräfte zu fesseln, die gewaltsam nach außen drängen.

Literatureinführung.

Für ein eingehenderes Studium sei empfohlen:

L. Graetz, Die Elektrizität und ihre Anwendungen. Stuttgart, Verlag von J. Engelhorn.

Das Werk behandelt das Gesamtgebiet der Elektrotechnik, die Stark- und Schwachstromtechnik einschließlich der drahtlosen Telegraphie. Das Studium setzt keine mathematischen Kenntnisse voraus, es eignet sich das Buch daher für jeden gebildeten Laien.

Dr. Kalhäne, Die neueren Forschungen auf dem Gebiete der Elektrizität und ihre Anwendungen. Verlag von Quelle u. Meyer, Leipzig.

Dieses Buch ist ebenfalls für die Allgemeinheit bestimmt, es behandelt, wie der Titel schon sagt, die neueren Anwendungen, ohne ich in technische Einzelheiten zu vertiefen. Etwas mathematische Kenntnisse sind für das volle Verständnis erwünscht.

P. Eversheim, Die Elektrizität als Licht- und Kraftquelle. Sammlung Wissenschaft und Bildung, im Verlag von Quelle u. Meyer, Leipzig.

Der Verfasser bespricht in knapper Form die physikalischen Grundlagen und führt dann dem Leser jene zahlreichen Anwendungen vor Augen, die wir auf dem Gebiete der Stark- und Schwachstromtechnik antreffen. Wie bei allen Bändchen der Sammlung ist der Inhalt gemeinverständlich gehalten und setzt keine besonderen Kenntnisse voraus.

Gust. Benischke, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Verlag von Jul. Springer, Berlin.

Dieses Buch dient zum eingehenderen Studium der Elektrotechnik, mathematische Kenntnisse, auch die der höheren Mathematik sind erforderlich. Es eignet sich besonders für solche, die infolge ihres Berufes genötigt sind, sich etwas eingehendere Kenntnisse aus den verschiedenen Gebieten der Elektrotechnik zu erwerben.

s dem
Kurt

rge um=
chflossen
erfassers'
Freude
stickigen
Menschen
ude er=
Zeitung.
Roman
Kur=
Lehfels.
M. 7.—
ein inte=
die wirk=
ltende
fesselnden
hler weiß
reußischen
Der Tag.
Roman
eit. Von
M. 7.—
schichtliche
nde Glanz
htslosigkeit
Erstarkung.
Hamburger

Roman
von
. M. 7.—.
t und Be=
uns hinter
Die Fabel
erzählt uns
Irdischen,
, der seine
nchören satt
nde schlang,
, bis er in
." Der Tag.

